



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MOBILIDADE DE FÓSFORO DE FONTES ORGÂNICAS E INORGÂNICA EM
SOLO ARENOSO**

Raphael Passaglia Azevedo

AREIA – PB

MAIO – 2014

RAPHAEL PASSAGLIA AZEVEDO

**MOBILIDADE DE FÓSFORO DE FONTES ORGÂNICAS E INORGÂNICA EM SOLO
ARENOSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Solos e Agroecossistemas Familiares.

Orientador: Prof. PhD. Ignácio Hernan Salcedo

AREIA – PB

MAIO – 2014

Ficha Catalográfica Elaborada na Seção de Processos Técnicos da
Biblioteca Setorial do CCA, UFPB, Campus II, Areia – PB.

A994m Azevedo, Raphael Passaglia.
Mobilidade de fósforo de fontes orgânicas e inorgânicas em solo arenoso /
Raphael Passaglia Azevedo. - Areia: UFPB/CCA, 2014.
58 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agrárias.
Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2014.

Bibliografia.
Orientador: Ignácio Herman Salcedo.

1. Solo 2. Adsorção 3. Lixiviação 4. Dessorção 5. Esterco I. Saçcedo, Ignácio
Hermman. (Orientador) II. Título.

UFPB/CCA CDU: 631.4(043.3)

RAPHAEL PASSAGLIA AZEVEDO

**MOBILIDADE DE FÓSFORO DE FONTES ORGÂNICAS E INORGÂNICA EM
SOLO ARENOSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de concentração: Solos e Agroecossistemas Familiares.

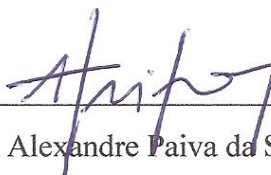
Aprovada em 30 / 05 / 2014

BANCA EXAMINADORA

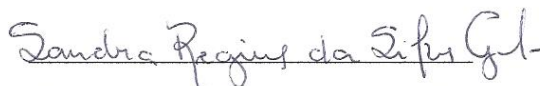


Prof. PhD. Ignácio Hernan Salcedo
UFPE/INSA
Orientador

Prof^ª. Dr^ª. Hemmannuella Costa Santos
CCHASA/UFPB
Examinadora - Interna



Prof. Dr. Alexandre Paiva da Silva
DSER/CCA/UFPB
Examinador - Interno



Prof^ª. Dr^ª. Sandra Regina da Silva Falcão
IFSertão – PE
Examinadora - Externa

A Deus,

aos meus familiares e orientadores.

*A todos aqueles que contribuíram e
acreditaram em mim e no trabalho.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde e força.

À minha família, meu pai, minha mãe, minha irmã, que mesmo na distância me apoiou, me direcionou colaborando de forma crucial na minha formação ao longo da vida;

Agradeço de forma especial a minha tia (dona Rogéria) e meu tio (seu Eli) pelo apoio durante tantos anos, o carinho e amparo;

Aos meus orientadores durante essa longa jornada, Ignácio H. Salcedo, Vânia da S. Fraga e Bruno de O. Dias;

Ao Laboratório de Matéria Orgânica do Solo, representado por Priscila A. Lima, Renato Souza, Luan Nunes e Professora Vânia da S. Fraga;

Especialmente ao companheirismo essencial da minha querida amada Bruna I. R. Cesario.

Aos meus amigos que me deram a oportuna chance que conviver com eles, Marcolino Brigido, Danilo Yassumoto, Nathalia F. Canassa e toda a turma;

Aos amigos que longe sempre estiveram perto, Thiago I. Bueno, Luana M. Dias e todos os companheiros de longas datas que apoiaram e incentivaram.

A atenção e disponibilidade do proprietário do campo de coleta e aos funcionários dos departamentos onde foram coletados os esterco.

Agradeço também à professora Kelly Gomes pelo apoio técnico, ao CNPq pela concessão da bolsa, a instituição CCA/UFPB e ao PPGCS.

Agradeço

SUMARIO

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	iv
RESUMO	v
ABSTRAT	vi
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS	9
2.1 Geral	9
2.2 Específicos	9
3. REVISÃO DE LITERATURA	9
3.1. Formas e liberação de P	9
3.2. Lixiviação de P	11
3.3. Adsorção de P	12
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
4.1. Caracterização da área	14
4.1.1. Coleta e caracterização das amostras	15
4.2. Experimento de lixiviação com colunas de solo.....	20
4.2.1. Caracterização das fontes (orgânicas e inorgânica)	21
4.2.2. Delineamento experimental e tratamentos.....	22
4.2.3. Montagem das colunas.....	23
4.2.4. Turnos e volume de solução percolada	24
4.2.5. Determinações no lixiviado	26
4.2.6. Análise do solo das colunas	26
4.2.7. Balanço de P solúvel em água (Pw).....	26
4.3. Análise estatística	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1. Experimento 1 - colunas de 20 cm	28
5.2. Experimento 2 – colunas de 40 cm	33
5.3. Adsorção e Dessorção de P.....	35
6. CONCLUSÕES	42
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
7. REFERÊNCIAS	44

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Precipitação anual dos últimos dezessete anos no município de Remígio – PB..... 14
- Figura 3.** Sistema de fornecimento de solução salina às colunas de solo; A: sistema montado para o experimento 2 (colunas de 40 cm); B: croqui do sistema de distribuição de solução salina às colunas de solo..... 25
- Figura 4.** Lixiviação de P (mg) de um NEOSSOLO REGOLÍTICO acondicionado em colunas de 20 cm (experimento 1) tratadas sem e com quatro fontes orgânicas ou uma inorgânica em função do volume de poros aplicado. Fig. **A:** lixiviação de P (mg) de todos os tratamentos; Fig. **B:** mesmo que a figura **A** com corte no eixo “y” no teor correspondente a 0,6 mg de P..... 28
- Figura 5.** Lixiviação acumulada de P (mg) de um NEOSSOLO REGOLÍTICO acondicionado em colunas de 20 cm tratadas sem e com quatro fontes orgânicas ou uma inorgânica em função do volume de poros aplicado. Fig. **A:** lixiviação acumulada de P (mg) de todos os tratamentos; Fig. **B:** mesmo que a figura **A** com corte no eixo “y” no teor correspondente a 3 mg de P. Tratamentos seguidos de mesma letra minúscula não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,1$). 29
- Figura 6.** Distribuição da concentração de P extraído com água de colunas de 20 cm de profundidade de um NEOSSOLO REGOLÍTICO após a aplicação de 10 volumes de poros. Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,1$), letras minúsculas comparam fontes dentro de cada profundidade e letras maiúsculas comparam profundidade dentro de cada fonte. A sequência das letras respeita a ordem da legenda dos tratamentos (esterco bovino, suíno, caprino, aves de postura, fonte inorgânica e testemunha)..... 31
- Figura 7.** Distribuição da concentração de P extraído com água das colunas de 40 cm de profundidade de um NEOSSOLO REGOLÍTICO após a aplicação de 10 volumes de poros. Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,1$), letras minúsculas comparam fontes dentro de cada profundidade e letras maiúsculas comparam profundidade dentro de cada fonte. A sequência das letras respeita a ordem da legenda dos tratamentos (esterco bovino, suíno, caprino, aves de postura, fonte inorgânica e testemunha)..... 34

Figura 8. A: Isotermas de Langmuir para as profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm; B: dessorção de P para as profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm utilizando fitas de Fe.	36
Figura 9. Distribuição da concentração de P extraído com Mehlich-1 de colunas de 40 cm de profundidade de um NEOSSOLO REGOLÍTICO após a aplicação de 10 volumes de poros. Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,1$), letras minúsculas comparam fontes dentro de cada profundidade e letras maiúsculas comparam profundidade dentro de cada fonte. A sequência das letras respeita a ordem da legenda dos tratamentos (esterco bovino, suíno, caprino, aves de postura, fonte inorgânica e testemunha).....	40
Figura 10. Relação entre P extraído por Mehlich-1 e P extraído por água de um NEOSSOLO REGOLÍTICO proveniente de agricultura familiar tratado com fontes orgânicas e inorgânica após 10 VP.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química de um NEOSSOLO REGOLÍTICO de área com agricultura familiar.	17
Tabela 2. Características físicas de um NEOSSOLO REGOLÍTICO de área com agricultura familiar.	18
Tabela 3. Caracterização mineralógica de um NEOSSOLO REGOLÍTICO de área com agricultura familiar.	18
Tabela 4. Caracterização química das fontes orgânicas utilizadas nos experimentos com colunas de solo	22
Tabela 5. Quantidades das fontes orgânicas adicionadas ao solo das colunas.	23
Tabela 6. Quantidades de nutrientes adicionados ao solo das colunas via fonte inorgânica...23	
Tabela 7. Balanço de Pw nas colunas do experimento com colunas de 20 cm de um NEOSSOLO REGOLÍTICO tratado ou não com fontes orgânicas e uma inorgânica com as quais se adicionou a quantidade de 62,5 mg de P total.	32
Tabela 8. Balanço de Pw nas colunas de 40 cm de um NEOSSOLO REGOLÍTICO tratado ou não com fontes orgânicas e uma inorgânica.	35
Tabela 9. Parâmetros de dessorção (Fitas - Fe) e das isothermas de Langmuir ajustados por meio de regressão não linear para as profundidades de um NEOSSOLO REGOLÍTICO.	37
Tabela 10. Valores de P adsorvido estimado pela equação de Langmuir a partir das quantidades de P solúvel em água em equilíbrio para as profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm de um NEOSSOLO REGOLÍTICO tratado com fontes orgânicas e inorgânica após lixiviação com 10 VP.	39

RESUMO

RAPHAEL PASSAGLIA AZEVEDO. **Mobilidade de fósforo de fontes orgânicas e inorgânica em solo arenoso.** Areia-PB, Centro de Ciências Agrárias, UFPB, maio de 2014. 53p.il. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Orientador: Prof. PhD. Ignácio Hernan Salcedo.

O uso dos esterco tem se tornado uma importante fonte de suprimento de nutrientes às plantas na agricultura familiar. No entanto seu desbalanço quanto aos nutrientes tem levado à incorporação de altas doses, excedendo a necessidade das culturas, provocando acúmulo de nutrientes e sua lixiviação para camadas mais profundas, principalmente em solos arenosos. Esse trabalho objetivou avaliar a mobilidade de fósforo (P) proveniente de quatro fontes orgânicas e uma inorgânica solúvel, aplicados em colunas de 20 e 40 cm, e relacionando-a com as características de adsorção da fase sólida de um NEOSSOLO REGOLÍTICO obtido de área de agricultura familiar com longo histórico de adubação orgânica. As amostras foram coletadas nas camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm. Após secas e peneiradas, as amostras foram caracterizadas quanto às propriedades mineralógicas, físicas e químicas. Foi também determinado o conteúdo de Fe e Al extraídos por oxalato e assim como as cinéticas de dessorção e adsorção por Langmuir. A mobilidade de P foi determinada em dois experimentos de lixiviação, experimento 1 com colunas de solo de 20 cm e experimento 2 com colunas de solo de 40 cm. O solo da camada de 0-10 cm recebeu dose de fontes orgânicas (esterco bovino, suíno, caprino e de aves de postura) ou inorgânica (reagente PA solúvel). A dose das fontes foi baseada no P contido em 8 Mg ha⁻¹ de esterco bovino. A fonte inorgânica foi aplicada reproduzindo as quantidades N, P, K, no esterco bovino. Após incubação de 15 dias, as colunas foram preenchidas com solo das camadas de forma sequencial e lixiviadas com solução salina (CaCl₂ 0,001 mol L⁻¹) correspondente a 10 volumes de poros (VP), para ambos experimentos, um VP dia⁻¹. Foram coletadas três alíquotas por VP nas quais se analisou a concentração de P. Finalizada a lixiviação, as colunas foram seccionadas de 5 em 5 cm e analisado o teor de P extraído em água (Pw) e por Mehlich-1(Pm). Houve saída de P pela base da coluna no experimento 1, sendo maior com a fonte inorgânica; o comportamento diferenciado entre as fontes orgânicas e inorgânica relacionou-se com o Pw inicial das fontes. No experimento 2 não houve saída de P pela base da coluna, tendo o P ficado adsorvido na camada de 20-40 cm, na qual observou-se o maior potencial de adsorção de P.

Palavras-Chave: lixiviação, dessorção, adsorção, esterco.

ABSTRAT

RAPHAEL PASSAGLIA AZEVEDO. **Mobility of phosphorus from organic and inorganic sources in sandy soil.** Areia-PB, Centre of Agricultural Sciences, UFPB, May 2014. 53p.il. Dissertation. Graduate Program in Soil Science. Advisor: Prof.. PhD Ignácio Hernan Salcedo.

The use of manure has become an important source of supply of nutrients to plants in family farming. However its unbalanced nutrient contents has led to the incorporation of high doses of some nutrients, exceeding the requirement of the crops, causing nutrient accumulation and leaching to deeper layers, especially in sandy soils. This study aimed to quantify the mobility of phosphorus (P) from four organic sources and one soluble inorganic source, applied in columns 20 and 40 cm long filled with a NEOSSOLO REGOLÍTICO obtained from a farm area with long history of organic fertilization, and relating it to the sorption characteristics. The samples were collected from the 0-10, 10-20, 20-30 and 30-40 cm layers. After dried and sieved, the samples were characterized according to their mineralogical, chemical and physical properties. We also determined the content of Al and Fe extracted with oxalate as well as the kinetics of adsorption and desorption isotherms. The mobility of P was determined in two experiments: 1) experiment with soil columns of 20 cm and, 2) experiment with soil columns 40 cm long. The soil of 0-10 cm depth received a single rate of organic (cattle manure, swine, goats and laying hens) or inorganic (soluble reagent PA) sources. The amount applied was based on the P contained in 8 Mg ha⁻¹ of cattle manure. The inorganic source was applied reproducing the quantities N, P, K in the manure. After 15 days incubation, the columns were filled with the soil in sequential layers. Every day during 10 days the columns were leached with one-pore volume (PV) of saline solution (CaCl₂ 0.001 mol L⁻¹) in both experiments. Each PV was divided in three aliquots that were analyzed for P concentration. Once the elution was finished, the columns were divided in 5-cm long cores and the soil analyzed for water (P_w) and Mehlich-1 (P_m) extractable P. Phosphorus drained from the 20-cm long columns, with greater losses from the inorganic source; the different behavior between organic and inorganic sources was related to the initial P_w concentration in the sources. Phosphorus did not drain from the 40 cm long columns, but P leached from the 0-20 cm layer to the 20-40 cm layer, in which we observed the greatest potential for P adsorption.

Key words: leaching, desorption, adsorption, manure.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura familiar no Agreste paraibano tem como característica pouca ou nenhuma entrada de fertilizantes comerciais nitrogenados ou fosfatados. A descapitalização aliada ao alto custo dos insumos e a baixa tecnologia empregada impede a utilização destes fertilizantes, fazendo com que a fertilidade dos solos fique dependente do manejo da matéria orgânica (NASCIMENTO et al., 2003).

A adubação orgânica, principalmente a base de esterco, é amplamente utilizada pela agricultura familiar, sendo a principal fonte fornecedora de nutrientes as plantas, com isso seu efeito condicionador de solo tem sido pouco priorizado. Contudo a utilização do esterco na agricultura tem variado com a sua disponibilidade, afetando diretamente na quantidade e no tipo de esterco (bovino, suíno, caprino ou aves) utilizado.

No Nordeste tem se relatado o uso frequente de esterco bovinos e caprinos (sólidos) com doses variando entre 4 e 20 Mg ha⁻¹ (SABOURIN, et al., 2000; SILVA et al., 2007; GALVÃO et al., 2008; GALVÃO; SALCEDO 2009), enquanto que no sul do país onde há uma concentração maior de animais tem se usado esterco líquidos de suínos e bovinos com doses em torno de 80 m³ ha⁻¹ (PIOVESAN et al., 2009; BERTOL et al., 2010; CERETTA et al., 2010).

As concentrações dos nutrientes nos esterco são baixas, em comparação com as fórmulas comerciais, além de desbalanceadas, o que dificulta o suprimento nutricional das culturas de modo equilibrado. As doses, normalmente pensadas para atender a demanda de N, baseiam-se na ou no tamanho da área ou na capacidade de carga do veículo de transporte mais comum em cada região, geralmente são múltiplos de 4 toneladas. Ademais, a variabilidade da composição química dos esterco é considerada o que contribui para o acúmulo de um ou mais nutrientes no solo (GALVÃO et al., 2008).

Acúmulo de nutrientes em camadas superficiais, principalmente o P, tem sido relatado na literatura devido a aplicações continuadas de esterco por longos períodos, principalmente fora do Brasil (OJEKAMI, et al., 2011; KANG et al., 2011; RUBÆK et al., 2013). No País, aplicações anuais de esterco em áreas de agricultura familiar sobre NEOSSOLOS REGOLÍTICOS de textura arenosa da região subúmida do Nordeste brasileiro (Agreste) tem

resultado na acumulação de nutrientes na camada superficial (SILVA et al., 2007; GALVÃO et al., 2008), que se deslocam para camadas mais profundas, inclusive o fósforo, (GALVÃO; SALCEDO, 2009; XAVIER et al., 2009) que é um nutriente pouco móvel em solos de textura argilosa.

O acúmulo de P na camada superficial aumenta o risco do deslocamento vertical para fora do alcance das raízes, fato que, além de representar um prejuízo econômico para o agricultor, pode transformar-se em um problema ambiental, ao depreciar a qualidade das águas (SHARPLEY et al., 2004; NELSON et al., 2005; GALVÃO et al., 2008).

Na avaliação desse risco, é necessário considerar a composição química do solo, sobretudo os teores de Fe e Al pouco cristalinos extraíveis por oxalato. Mesmo os solos arenosos podem conter em sua fração argila pequenas quantidades de Fe e Al, suficientes para diminuir a movimentação do P (SIMS et al., 1998). Esses elementos também fazem parte da estrutura dos óxidos e hidróxidos nessa fração, os quais são os principais responsáveis pela adsorção de P no solo (NOVAIS et al., 2007; TARKALSON; LEYTEM, 2009).

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a mobilidade de fósforo proveniente de fontes orgânica (esterco bovino, suíno, caprino, aves de postura) e inorgânica solúvel, em um NEOSSOLO REGOLÍTICO de agricultura familiar com longo período de adubação orgânica e relacioná-la com as características de adsorção da fase sólida.

2.2 Específicos

- Caracterizar as propriedades de adsorção de P de um NEOSSOLO REGOLÍTICO;
- Determinar a quantidade de P solúvel no lixiviado;
- Avaliar a distribuição de P solúvel em água e P extraído por Mehlich-1 no perfil das colunas de solo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Formas e liberação de P

O P é um elemento que nos solos brasileiro se encontra com deficiência e o incremento da sua concentração pode se dar com a adubação inorgânica e/ou orgânica. Os solos da região Nordeste brasileira são deficientes em P, que é um dos elementos mais limitantes da produtividade das culturas na região (PEREIRA; FARIA, 1998).

No agreste paraibano, a agricultura é predominantemente familiar com o uso de fertilizantes químicos bastante reduzido (SILVA et al., 2007), prevalecendo o uso de fontes orgânicas como os esterco. Além disso, os fertilizantes orgânicos tem se tornado uma vital fonte de suprimento de nutrientes às plantas (ABDALA et al., 2012) além dos benefícios à fertilidade do solo promovidos pela sua ação condicionadora do solo.

O uso de fertilizantes orgânicos, principalmente esterco, interfere positivamente nos teores de matéria orgânica do solo, elevando a fertilidade e refletindo em maiores

concentrações no solo de macro e micronutrientes requeridos pelas plantas (MENEZES et al., 2008). O aumento da concentração de P na solução do solo com o uso de fontes orgânicas, se dá através da mineralização dos resíduos ou da matéria orgânica do solo. A adição de material orgânico favorece a solubilização microbiana do fosfato, a depender da natureza do material (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002), de sua recalcitrância, do conteúdo de compostos de difícil decomposição (lignina e compostos fenólicos) podendo haver diferentes taxas de liberação do P na solução.

Neste sentido, a utilização de fontes orgânicas com elevado teor de C poderá levar a uma imobilização do P da solução pela biomassa microbiana até que haja um decréscimo do teor de C da fonte e redução da relação C/P do resíduo a valores semelhantes aos da biomassa microbiana. De tal modo que o P da solução volta a aumentar predominando a mineralização sobre a imobilização (NOVAIS et al., 2007).

A taxa de mineralização do P no solo pode ser um indicador do seu potencial em suprir as necessidades das plantas. Esta taxa possui correlação positiva com a temperatura, com o pH do solo e a quantidade de P-orgânico, mas a relação C/P-orgânico não tem grande influência no processo, sendo a intensidade da mineralização afetada pelos diversos grupos de fosfatos que compõem a forma orgânica no solo (SANTOS et al., 2008). Contudo as fontes orgânicas possuem quantidades e dinâmica de liberação de nutrientes distinta. Kang et al. (2011), avaliando a lixiviação de P de várias fontes orgânica e inorgânica em solo de textura arenosa (horizonte Ap) da Carolina do Norte, Estados Unidos, perceberam maior liberação de P dos esterco líquido em comparação aos sólidos e semissólidos, sendo o esterco líquido de curral o que obteve a maior quantidade de P lixiviada, entre as fontes orgânicas, contudo, as fontes minerais superaram as orgânicas em aproximadamente duas vezes.

Avaliando a biodisponibilidade de N e P de materiais orgânicos (esterco, resíduos industriais, materiais vegetais e composto orgânico) Chacón, (2006), concluiu que a forma predominante de P nestas fontes é orgânica com maior mineralização nas duas primeiras semanas. Além disso, observou que houve correlação positiva entre o P-inorgânico mineralizado com os teores de P-orgânico do esterco e negativa com a relação C/P dos esterco.

Normalmente, o uso de materiais orgânicos como fonte de nutrientes é feito com base nas quantidades de N, embora o P dos esterco pode ser considerado como critério diferencial

para a identificação do potencial fertilizante (CHACÓN, 2006), além de que, a relação N/P que a planta absorve é mais ampla que a encontrada nos esterco (OLIVEIRA et al., 2011). Por esse motivo adubações consecutivas com o critério mencionado podem causar acúmulo de P no solo.

Periódicas aplicações de P via esterco tendem ao acúmulo deste nutriente nos solos, elevando suas quantidades de forma excedente, aumentando os riscos do deslocamento vertical e acúmulo deste fora do alcance das culturas e ainda podendo depreciar a qualidade das águas (SHARPLEY et al., 2004; NELSON et al., 2005; GALVÃO et al., 2008).

Quando a fonte fertilizante é de origem orgânica e de fácil decomposição, primeiramente ocorre acúmulo de P nas formas orgânicas que vão ser transformadas para formas inorgânicas somente após a mineralização (CERETTA et al., 2010) estando então disponíveis para absorção, adsorção e lixiviação. A dinâmica do P inorgânico no solo segue uma sequência sendo primeiramente adsorvido pelos sítios com maior energia de ligação, o P remanescente, então vai sendo distribuído e retido com menor energia, ou seja, com maior disponibilidade (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001).

3.2. Lixiviação de P

Em solos arenosos, com menores teores de alumínio e óxidos de ferro na fração argila, o P tende a acumular-se principalmente nas suas frações lábeis, com pouca ou nenhuma ação residual (CERETTA et al., 2010). Neste sentido, Galvão et al., (2008) e Galvão e Salcedo (2009), perceberam alto potencial de perda de P por lixiviação, em razão de intensa aplicação de esterco bovino em solos arenosos no Nordeste do Brasil, constatando presença de P a uma profundidade de até 0,60m, com teores 20 vezes mais altos que a testemunha (solo de pastagem não adubado). Oliveira et al. (2011), relataram acúmulo de nutrientes em altos níveis na camada superficial (0 a 20 cm) do solo além da necessidade das culturas, considerando o cenário como preocupante do ponto de vista econômico e ambiental.

A dinâmica da água desloca solutos para distintas profundidades do perfil (SANTOS et al., 2010), aliada a acumulação histórica de nutrientes via aporte de esterco determina aumentos nos teores em profundidade, indicando claramente a lixiviação (OLIVEIRA et al., 2011). A lixiviação varia com os atributos físicos do solo como textura, estrutura, profundidade e principalmente porosidade (SANTOS et al., 2010). Neste sentido Bertol et al.

(2010), afirmam que o potencial de perdas de P via sub superfície será maior em solos arenosos, assim como em sistemas de manejo com pouco revolvimento e fluxo preferencial em bioporos.

Destaque para as perdas de P com a utilização de esterco bovino foram dadas por Aguiar et al. (2006), avaliando a lixiviação de nutrientes num Argissolo Acinzentado com 8 % de argila e atribuíram não só à textura, mas também à ocupação dos sítios de sorção por ácidos orgânicos, os quais contribuíram efetivamente para a movimentação do P na vertical.

Por outro lado, Chardon et al. (1997), citados por Novais et al. (2007), analisando lixiviados de um solo, relataram que mesmo em solos que receberam apenas a fertilização inorgânica, nos lixiviados a predominância de P se deu na sua forma orgânica solúvel. Afirmando maior mobilidade deste nutriente no solo em sua forma orgânica. Contudo incrementos nas perdas de P podem ocorrer devido à decomposição da matéria orgânica (ULÉN; ETANA, 2010).

3.3. Adsorção de P

Ultimamente tem-se dado maior importância ao P inorgânico, visto que a agricultura brasileira é caracterizada por haver grande entrada de insumos, porém grande parte do P total do solo está na forma orgânica (42 e 57%) contribuindo na forma de um estoque, com papel de fonte de P ao solo (NOVAIS; SMYTH, 1999). No entanto, as características do solo podem o caracterizar como um dreno em situação onde se tem aumento das cargas positivas devido à presença de oxi-hidróxidos de Fe e Al e um favorecimento da adsorção dos fosfatos (NOVAIS et al., 2007).

O fenômeno de retenção de P pelo solo é favorável à utilização pelas plantas, no entanto, essa retenção aumenta com o passar do tempo formando P não-lábil, se tornando um problema quanto a sua disponibilidade (JORDÃO, 2006).

A adição de esterco tem influências positivas e negativas quanto à retenção de P e sua lixiviação. Alguns compostos da matéria orgânica ou o próprio P do esterco podem competir por sítios de sorção de P (GUPPY et al, 2005a; GUPPY et al., 2005b), aumentando o grau de saturação fazendo com que haja mais P disponível na solução do solo, mas também, na decomposição dos esterco há a formação de ácidos orgânicos que reduzem o pH, inibindo a

cristalização do Fe e Al deixando-os disponíveis para sorver P da solução (OJEKAMI et al., 2011).

A maioria dos solos tropicais possui uma alta capacidade de adsorção de P, fixando-o em sua forma inorgânica. Em solos com alta capacidade de adsorção de P, grandes quantidades são adsorvidas com uma maior energia de ligação, assim, o P só pode ser recuperado através de digestão do solo (CROSS; SCHLESINGER, 1995). A utilização de esterco como fonte de P possibilita uma maior cadência na liberação de P, com isso há diminuição da adsorção nos colóides do solo, causada pela incorporação de matéria orgânica.

As perdas de P não estão apenas relacionadas à sua labilidade, mas também às condições físicas, químicas e mineralógicas dos solos. Em solos arenosos o P pode percolar no perfil e comprometer a qualidade de águas subterrâneas, o que pode ser causado pela lixiviação de fertilizantes e doses excessivas de esterco (MEURER, 2008). Em solos arenosos a adsorção de P é descrita por dois processos, a adsorção rápida e reversível, de acordo com a cinética de Langmuir, combinado com um não-equilíbrio irreversível (VAN DER ZEE; VAN RIEMSDIJK, 1986).

Contudo, o P só será lixiviado quando o solo já estiver saturado (DELCAMPILLO et al., 1999), portanto, enquanto houver sítios de sorção de P, o P liberado dos resíduos orgânicos poderá ser adsorvido no solo, se tornando pouco disponível às plantas (CARNEIRO, 2012).

Trabalho realizado por Bertol et al., (2010) com colunas indeformadas de um LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico de textura muito argilosa, indicam que a maior quantidade de P lixiviado foi encontrado no tratamento com adubação inorgânica, mesmo quando a quantidade de P aplicada via dejetos líquidos de suíno possuía concentração 6 vezes maior. Outro fato importante destacado pelos autores é que o comportamento da lixiviação do P foi invertida para as fontes, sendo que a adubação inorgânica diminuía a concentração de P conforme aumentavam os volumes de poros aplicados, enquanto para a fonte orgânica ocorria o inverso. Os autores justificaram o fato ressaltando que a maior parte do P da adubação inorgânica encontrava-se na forma solúvel, já nos esterco líquidos de suínos o P predominava em sua forma orgânica, necessitando haver então a mineralização.

Muito se tem estudado quanto à lixiviação de P em solos arenosos, porém fora do país (SCHOUMANS; GROENENDIJK, 2000; TARKALSON; LEYTEM, 2009; KANG et al., 2011; OJEKAMI et al., 2011), no Brasil, os estudos estão focados em solos argilosos das regiões Sul e Sudeste (FRANCHINI, et al., 1999; OLIVEIRA et al., 2002; BASSO, 2003; CEMBRANELLI 2006; FOLONI; ROSELEM, 2006; DONAGEMMA et al., 2008; PIOVESAN et al., 2009; BERTOL et al., 2010) havendo pouca literatura para as condições do Nordeste brasileiro, em específico no semiárido, sendo então preciso estudos aprofundados neste assunto que visem a obtenção de informações relevantes quanto boa utilização de fontes orgânicas em detrimento das perdas de P.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área

A coleta do solo foi realizada no município de Remígio no estado da Paraíba, que está localizado na Mesorregião do Agreste paraibano. Situado nas coordenadas de: 6° 57'56,3" de latitude S; 35° 47'37,7" de longitude W, com altitude média de 530 m. Segundo a classificação de Köepen o clima da região é o As', quente e úmido, com estação chuvosa entre fevereiro e agosto (BRASIL, 1972). A precipitação acumulada dos últimos dez anos perfaz uma média de 941,1 mm anuais (AESAs, 2014) (Figura 1).

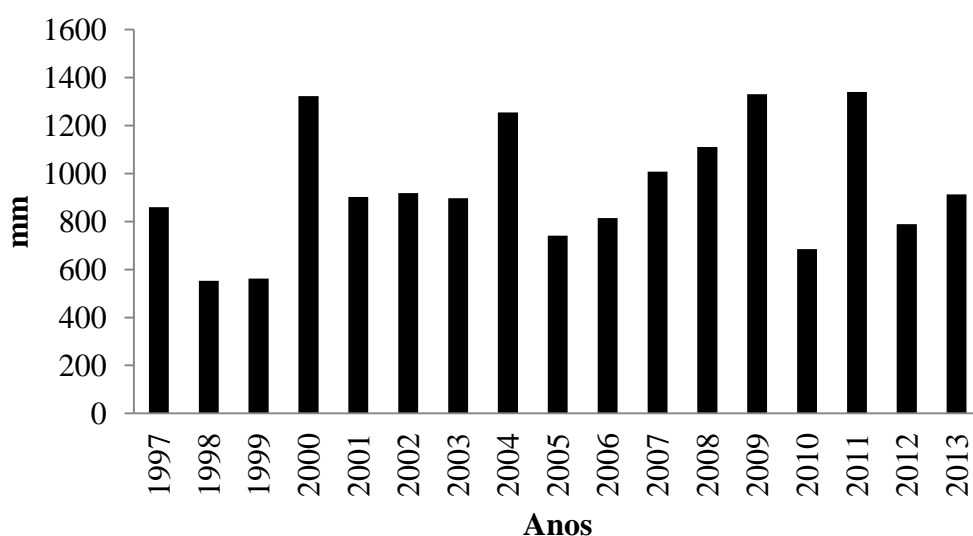


Figura 1. Precipitação anual dos últimos dezessete anos no município de Remígio – PB.

O solo com declividade de 3% foi classificado como NEOSSOLO REGOLÍTICO Brasil, (1972) e adaptado por Embrapa (2006). Este é o tipo de solo característico do município que representa aproximadamente 40 % do território.

O histórico da área foi fator preponderante para sua escolha, pois em aproximadamente 40 anos, nos cultivos realizados nunca fora usado adubo comercial, apenas orgânico, especificamente esterco bovino. Nesta propriedade que também possui criação de bovinos, o esterco produzido é acumulado, armazenado e anualmente distribuído na lavoura, sendo esta a única fonte de nutrientes externa. As quantidades anualmente utilizadas variam em função da quantidade de animais, que por sua vez dependem do mercado, da qualidade da pastagem e da distribuição das chuvas na região. Quando as condições financeiras são melhores o esterco é adquirido de outras propriedades

O manejo dado ao solo da área experimental segue os moldes tradicionais da agricultura familiar regional (aração com tração animal e preparo de covas utilizando enxada) e segundo informações do proprietário e lavrador o plantio do milho é realizado todo ano e esporadicamente o consórcio de milho e feijão nos anos com chuva abundante. Em visita realizada em janeiro de 2013 o proprietário chegou a relatar que o ano não seria bom de chuvas e como 2012 também não havia sido ele decidiu não plantar, quebrando um ciclo de longos anos, o que não comprometeu os estudos.

O solo utilizado neste experimento foi escolhido devido as suas características naturais e do seu histórico de adubação. Assim, pretende-se visualizar o deslocamento de P em função da adubação com diferentes fontes orgânicas e inorgânica.

4.1.1. Coleta e caracterização das amostras

O solo da área experimental foi coletado em fevereiro de 2013, em amostragem simples numa área de 2x3 m, localizada nas seguintes coordenadas geográficas: 6° 59'14,8" de Latitude S e 35° 48'14,6" de longitude W, com altitude de 638 m. A coleta procedeu-se com a retirada do solo em camadas, nas quatro profundidades: 0 a 10; 10 a 20; 20 a 30 e 30 a 40 cm. Após coletadas foram levadas ao Departamento de Solos e Engenharia Rural – DSER da Universidade Federal da Paraíba - UFPB onde foram secas ao ar, destorroadas, com vários revolvimentos para uma secagem e paralização da microbiota mais rápida. O solo de todas as profundidades foi peneirado em malha de 4 mm, retirando-se os materiais grosseiros para se obter um material uniforme para confecção das colunas.

A caracterização química do solo foi feita no Laboratório de Matéria Orgânica do Solo do DSER. Foram determinadas as seguintes características: pH em água 1:2,5 (m/v), N-mineral composto pela soma de nitrato (N-NO_3^-) e amônio (N-NH_4^+) que foram extraídos com $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ determinados por injeção em fluxo utilizando FIALab – 2500 seguindo o proposto por Kamphake et al. (1967) para N-NO_3^- e por Krom (1980) para N-NH_4^+ , citadas por Zotelli (2012).

Foram determinados o fósforo extraído com Mehlich-1 (Pm), fósforo remanescente (Prem) determinado após agitação do solo com solução de Ca_2Cl a $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e P a 60 mgL^{-1} (ALVAREZ et al. 2000), fósforo solúvel em água (Pw) extraído com água deionizada e o sobrenadante filtrado em membrana de $0,45 \mu\text{m}$ sob sistema de vácuo, sendo as concentrações de P dos extratos determinadas através da formação de complexo fósforo-molibdico (cor azul) obtido pela redução do molibdato na presença ácido ascórbico em espectrofotômetro de absorvância (MURPHY; RILEY, 1962).

O potássio determinado foi extraído com Mehlich-1 (Km) e em água (Kw), sódio extraído com Mehlich-1 (Nam) e o sódio solúvel em água (Naw) sendo determinadas as concentrações nos extratos através do fotômetro de chama; e os cátions cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) extraídos com KCl e determinados por titulometria (EMBRAPA, 2011).

O carbono orgânico total (COT) foi determinado por oxidação-difusão úmida (SNYDER; TROFYMOW, 1984); o carbono solúvel em água (Cw) foi determinado pelo método proposto por Bartlett e Ross (1988) e adaptado por Mendonça e Matos (2005), em que se estima a quantidade de carbono presente na solução através da perda de cor formada pelo complexo $\text{Mn(III)-pirofosfato}$, quando o Mn(III) torna-se reduzido pelo carbono orgânico na presença de H_2SO_4 . Além disso, foram determinados ferro (Fe) e alumínio (Al) extraídos com oxalato de amônio $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 3 e determinados por absorção atômica (SCHWERTMANN, 1964) (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química de um NEOSSOLO REGOLÍTICO de área com agricultura familiar.

Características	Unidade	Profundidade (cm)			
		0 a 10	10 a 20	20 a 30	30 a 40
Ph	1:2,5(H ₂ O)	6,07	6,06	5,82	5,68
NO ₃ ⁻	mg kg ⁻¹	0,18	0,66	1,05	0,79
NH ₄ ⁺	mg kg ⁻¹	0,48	3,12	0,94	0,78
N- mineral	mg kg ⁻¹	0,66	3,78	2,00	1,57
Pm	mg kg ⁻¹	8,25	2,88	2,00	2,16
P-rem	mg kg ⁻¹	53,2	49,3	35,9	21,3
Pw	mg kg ⁻¹	1,15	0,79	0,64	0,64
Km	mg kg ⁻¹	64,2	36,6	27,4	22,8
Kw	mg kg ⁻¹	32,3	10,6	5,71	2,76
Nam	mg kg ⁻¹	18,6	13,7	16,6	17,6
Naw	mg kg ⁻¹	1,88	0,53	0,91	1,88
Ca ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	0,98	0,91	0,70	0,47
Mg ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	0,31	0,25	0,33	0,36
Al ³⁺	mg kg ⁻¹	0,00	0,00	0,17	0,37
Cw	mg kg ⁻¹	79,1	42,7	51,6	37,0
C	g.kg ⁻¹	6,59	4,45	5,58	5,16
MO	%	1,14	0,77	0,96	0,89
Fe-ox	mg g ⁻¹	0,11	0,17	0,20	0,37
Al-ox	mg g ⁻¹	0,12	0,22	0,30	0,47

pH: determinado em água 1:2,5 (m/v); NH₄⁺, NO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺: extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; N-mineral: (NH₄⁺ + NO₃⁻); Pm, Km, Nam: extraídos com Mehlich-1; Pw, Kw, Naw, Cw: extraídos com água; Prem: determinado em solução CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ 60 mg P L⁻¹ 1:10 (m/v); C: digestão sulfúrica fosfórica 3:2 (H₂SO₄/H₃PO₄); MO: C * 1,724; Fe-ox, Al-ox: extraídos com oxalato de amônio a 0,2 mol L⁻¹ a pH 3.

As análises de caracterização físicas do solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo com a determinação dos seguintes parâmetros: granulometria pelo método do densímetro, densidade de partícula (Dp), densidade solo (Ds) e porosidade total (PT), seguindo metodologia descrita pela Embrapa (2011) (Tabela 2).

Tabela 2. Características físicas de um NEOSSOLO REGOLÍTICO de área com agricultura familiar.

Profundidade	Ds	Dp	PT	Areia	Silte	Argila	Classe textural
cm	----- g cm ⁻³ ---		%	----- g kg ⁻¹ -----			
0 a 10	1,62	2,60	37,7	852	96	52	Areia franca
10 a 20	1,63	2,62	37,8	808	96	96	Areia franca
20 a 30	1,57	2,62	40,1	758	97	145	Franco arenosa
30 a 40	1,57	2,60	39,6	677	147	176	Franco arenosa

Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; PT: porosidade total.

Para caracterização mineralógica das profundidades do solo, uma amostra de cada camada foi passada por peneira de 2 mm, macerada e peneirada em malha de 200 mesh, A análise mineralógica foi realizada em equipamento X-Ray Diffractometer da marca Siemens, modelo D 5000, operando com radiação K α de cobre, 30kV e 30mA, com varredura de 5° e 55° (2 θ) no Laboratório de Solidificações Rápidas (LSR) (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização mineralógica de um NEOSSOLO REGOLÍTICO de área com agricultura familiar.

Profundidade	Quartzo	Feldspato	Hematita	Total
cm	----- % -----			
0 a 10	97,0	2,29	0,69	100
10 a 20	82,5	16,5	1,03	100
20 a 30	81,8	17,8	0,42	100
30 a 40	8,84	90,2	0,93	100

Afim de, obter mais informações sobre as possíveis interações do P com a matriz do solo, foi realizado ensaios de dessorção e adsorção de P para as quatro profundidades do solo da área experimental.

A cinética de dessorção do fósforo foi obtida utilizando papel impregnado com ferro (Fitas-Fe), (VAN DER ZEE et al., 1987). Para tanto 3 g de solo de cada profundidade foi agitada com 30 cm³ de água deionizada junto com 3 fitas-Fe em tubo de centrífuga de 45 cm³ durante os períodos de 1; 7; 22; 28; 43; 48 e 72 horas. Após cada tempo as fitas foram lavadas (0,5 cm³ de água deionizada para cada face) e trocadas. Em seguida as fitas lavadas foram transferidas para tubos de centrífuga contendo 30 cm³ de solução sulfúrica a 0,2 mol L⁻¹ (H₂SO₄), agitadas por 24 horas e determinado P do extrato (MURPHY; RILEY, 1962).

Os dados obtidos da dessorção de P com fitas de Fe foram processados pelo programa SigmaPlot 10 (SYSTAT SOFTWARE, 2006), onde foi estimado o fósforo adsorvido na superfície do solo (Q_{in}) e a taxa de dessorção (k_d) segundo a equação 1.

Considerando que a dessorção do P no solo acontece na presença de uma superfície de alta afinidade por P e com elevada capacidade de extrair P do solo (Fitas-Fe) assim foi utilizada a equação 1 para determinação do P adsorvido e da taxa de dessorção de P do solo.

$$Q = Q_{in} \{ 1 - \exp(-k_d t) \} \quad (1)$$

em que:

Q = fósforo dessorvido (mg kg^{-1})

Q_{in} = fósforo adsorvido (mg kg^{-1})

k_d = taxa de dessorção (h^{-1})

t = tempo (h)

Em seguida o teste de adsorção de P foi realizado pelo método “batch” adaptando a metodologia descrita em Farias et al. (2009). Agitou-se 4 g de solo (de cada profundidade em triplicata) em solução de CaCl_2 a $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ com concentrações crescentes de P (0; 5; 10; 20; 40; 60 e 100 mgL^{-1}) por um período de 24 horas. Em seguida foram centrifugadas e determinado o P do sobrenadante (solução em equilíbrio) (MURPHY; RILEY, 1962).

A concentração adsorvida foi determinada através da equação de adsorção (2) adaptada por Salcedo (comunicação pessoal), onde utilizou a equação de adsorção proposta por Soares e Casagrande (2009) mais a quantidade adsorvida inicialmente (Q_{in}) proposta por Van der Zee et al. (1987):

$$[]_{ads} = \frac{V_{solução}[(C_0 - C_e)]}{M_{solo}} + Q_{in} \quad (2)$$

em que:

$[]_{ads}$: concentração de P adsorvida (mg kg^{-1})

$V_{solução}$: volume de solução (L)

C_0 : concentração de P da solução inicialmente adicionada (mg L^{-1})

C_e : concentração de P remanescente na solução de equilíbrio (mg L^{-1})

M_{solo} : massa do solo (kg)

Q_{in} : fósforo adsorvido extraído com fitas de ferro (mg kg^{-1})

Então os resultados obtidos no ensaio de “batch” foram ajustados as isotermas de Langmuir utilizando o programa SigmaPlot 10 (SYSTAT SOFTWARE, 2006).

A isoterma de Langmuir descreve um processo de adsorção rápido e reversível do P na superfície de oxi-hidróxidos e metal-fosfatos presentes no solo, além de estimar a capacidade máxima de adsorção de P (Q_{max}) e a energia de ligação do P ao solo (K_L), assim descrita pela equação cinética (3):

$$[]_{\text{ads}} = \frac{Q_{\text{m}} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

em que:

$[]_{\text{ads}}$: concentração de P adsorvida (mg kg^{-1})

Q_{max} : capacidade máxima de adsorção de P do solo (g kg^{-1})

K_L : constante relacionada com energia de ligação entre o solo e P (L kg^{-1})

C_e : concentração remanescente na solução de equilíbrio (mg L^{-1})

4.2. Experimento de lixiviação com colunas de solo

O experimento foi conduzido de junho a dezembro de 2013 em ambiente protegido no Departamento de Solos e Engenharia Rural do Centro de Ciências Agrárias – CCA, Campus II da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, localizada em Areia – PB.

O experimento foi dividido em dois ensaios, sendo o primeiro com colunas de 20 cm, e amostras de solo das profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm, No segundo com colunas de 40 cm e com amostras de solo das profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm.

Para avaliar o movimento do P foram utilizadas colunas deformadas de um NEOSSOLO REGOLÍTICO de agroecossistema familiar em ambos os ensaios e foi utilizada uma solução percolante salina (CaCl_2 0,001 mol L⁻¹), para evitar desestabilização dos colóides do solo comprometendo a força iônica (ROY; DZOMBAK, 1995).

O solo utilizado por ser bastante arenoso não possuir estrutura definida é chamado de pseudomorfo (EMBRAPA, 2006), por essa razão não foram utilizadas para este experimento colunas indeformadas, além disso, pela necessidade de se fazer a mistura das fontes na camada superficial (0 a 10 cm) do solo e quanto a dificuldade de aquisição das mesmas por não haver equipamento específico para tal coleta, excluindo a necessidade de colunas de solo indeformadas.

4.2.1. Caracterização das fontes (orgânicas e inorgânica)

As fontes orgânicas coletadas no CCA/UFPB em junho de 2012, foram curtidas até fevereiro de 2013. Em seguida foram secas ao ar e em estufa de circulação forçada de ar a 55° C, destorroadas e peneiradas em peneira de 2 mm e armazenadas em recipientes hermeticamente fechados. A fonte inorgânica constou de reagentes prontos para análise (PA) utilizando como fontes de N, P e K: sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), fosfato monossódico ($\text{PO}_4\text{H}_2\text{Na}$) e cloreto de potássio (KCl), respectivamente.

Os materiais orgânicos foram caracterizados quimicamente no laboratório de Matéria Orgânica do Solo (MOS), onde determinou-se as seguintes características: pH em água 1:10 (m/v); condutividade elétrica no mesmo extrato do pH; N, P, K e Na total (N_t , P_t , K_t e Na_t) que foram obtidos por digestão sulfúrico perclórica, sendo N_t quantificado pelo método de Kjeldahl por destilação com arraste de vapor (TEDESCO et al., 1985), $N\text{-NO}_3^-$ e $N\text{-NH}_4^+$ utilizando FIALab – 2500 (ZOTELLI, 2012) respectivamente,

Os nutrientes P_t por Murphy; Ryley (1962) e K_t e Na_t através do fotômetro de chama; P_m , K_m , Na_m , obtidos através de extração com Mehlich-1; P_w , K_w , Na_w extraídos com água; C_w (MENDONÇA; MATOS, 2005, adaptado de BARTLETT; ROSS, 1988), COT por oxidação-difusão úmida (SNYDER; TROFYMOW, 1984) e as cinzas pelo método da EMBRAPA (2011) (Tabela 4).

Tabela 4. Caracterização química das fontes orgânicas utilizadas nos experimentos com colunas de solo

Característica	Unidade	Fontes orgânicas			
		E. Bovino	E. Suíno	E. Caprino	E. Aves Postura
pH	(1:10)	8,02	7,70	9,07	9,78
CE	mS/cm	2,71	4,05	5,06	5,48
Nt	g kg ⁻¹	24,7	34,4	24,9	17,8
NO ⁻³	g kg ⁻¹	1,38	1,14	0,75	1,17
NH ⁺⁴	g kg ⁻¹	1,54	1,67	4,27	0,62
N mineral	g kg ⁻¹	2,92	2,81	5,02	1,80
Pt	g kg ⁻¹	4,42	14,3	11,6	20,1
Pw	g kg ⁻¹	1,23	3,66	0,89	1,99
Pm	g kg ⁻¹	3,43	10,7	2,50	3,75
Kt	g kg ⁻¹	10,8	14,1	23,5	23,4
Kw	g kg ⁻¹	7,18	9,23	12,7	15,6
Km	g kg ⁻¹	8,94	12,4	22,2	22,3
Nat	g kg ⁻¹	3,38	8,81	4,69	7,81
Nat	g kg ⁻¹	1,08	0,40	1,31	3,41
Nam	g kg ⁻¹	1,26	6,38	2,11	4,41
Ct	g kg ⁻¹	315	319	277	113
Cw	g kg ⁻¹	1,15	1,30	1,30	0,93
C/N		12,8	9,28	11,1	6,4
C/P		71,4	22,4	23,8	5,6
Cinzas	%	33,3	25,1	38,3	64,4

pH: determinado em água 1:10 (m/v); NH₄⁺, NO₃⁻: extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; N-mineral: (NH₄⁺ + NO₃⁻); Nt, Pt, Kt, Nat: digestão sulfúrica perclórica; Pm, Km, Nam: extraídos com Mehlich-1; Pw, Kw, Naw, Cw: extraídos com água; Ct: digestão sulfúrica fosfórica 3:2 (H₂SO₄/H₃PO₄); C/N: relação entre Ct e Nt; C/P: relação entre Ct e Pt.

4.2.2. Delineamento experimental e tratamentos

Em ambos os ensaios o delineamento experimental adotado foi o de blocos inteiramente ao acaso com seis tratamentos e três repetições para o experimento 1 e duas repetições para o experimento 2. Totalizando 18 e 12 unidades experimentais, respectivamente. Os tratamentos constaram de quatro fontes orgânicas (esterco bovino, suíno, caprino e aves de postura), uma fonte inorgânica e uma testemunha.

Para a definição da dose de esterco a ser utilizada os cálculos foram baseados na quantidade de P_t contida no esterco bovino, considerando a aplicação de 16 Mg ha⁻¹ nos primeiros 20 cm de solo, que é a média anual aplicada na região (GALVÃO; SALCEDO, 2009; OLIVEIRA et al., 2011). Contudo para uma melhor observação do deslocamento

optou-se por utilizar uma dose equivalente de 8 Mg ha⁻¹ de esterco bovino para os 10 cm iniciais. Baseado nesta dose fixou-se a quantidade de P para as demais fontes orgânicas (esterco suíno, caprino e aves de postura), ajustando-as para o mesmo aporte de P do esterco bovino (35,3 kg ha⁻¹) (Tabela 5).

Tabela 5. Quantidades das fontes orgânicas adicionadas ao solo das colunas.

Unidade	Fonte Orgânica			
	Bovino	Suíno	Caprino	Aves de postura
Mg ha ⁻¹	8	2,48	3,03	1,76
mg g ⁻¹	4,4*	14,3	11,6	20,1
g coluna ⁻¹	14,1	4,4	5,4	3,1

*Dose fixada.

Quanto à fonte inorgânica calculou-se de forma que ela reproduzisse as quantidades de N, P e K presentes no esterco bovino. As fontes utilizadas foram (NH₄)₂SO₄, PO₄H₂Na e KCl e suas quantidades seguem na tabela 6.

Tabela 6. Quantidades de nutrientes adicionados ao solo das colunas via fonte inorgânica.

Fonte Inorgânica		Nutriente/8 Mg de esterco bovino	Nutriente a ser aplicado	Reagente PA adicionado
Fórmula	Nutriente	kg	----- mg coluna ⁻¹ -----	
NH ₄ SO ₄	N	197	348	1640
NaH ₂ PO ₄ H ₂ O	P	35,3	62,4	278
KCL	K	86,1	152	290

Todos os cálculos para se atingir as quantidades das fontes para a coluna foram calculados com base no volume de solo da camada (10 cm). Sendo o volume do solo a ser misturada a fonte, orgânica ou inorgânica, de 1767 cm³, o que correspondeu a uma massa de solo de 2650 g.

4.2.3. Montagem das colunas

Para a montagem das colunas foram utilizados canos de PVC com aproximadamente 150 mm de diâmetro e 25 e 45 cm de altura para o experimento 1 e 2, respectivamente, sendo 5 cm de bordadura. A extremidade inferior da coluna foi fechada com tela de nylon com abertura de 77 µm para evitar a saída de solo durante a percolação da solução e outra tela de

nylon (sombrite 50%) para manter a massa de solo da coluna, ambas presas com arame e cola de PVC. Cada coluna teve sua superfície interna lixada, pincelada com cola de policloropreno e resinas sintéticas (cola de sapateiro) e espalhada areia lavada com solução ácida de HCl diluída em água destilada (10%). Tal procedimento foi adotado para aumentar a aderência do solo à parede do cano, evitando assim caminhos preferenciais pelas paredes internas durante a percolação da solução.

As fontes orgânicas foram misturadas na camada superior (0 a 10 cm) do solo em ambos os experimentos, a mistura foi umedecida com água destilada até 40% do volume total de poros (VTP) e incubados por 15 dias, para estabilização da atividade microbiana, mantendo a umidade por meio de pesagens diárias. Após a incubação a mistura foi seca ao ar. Este procedimento não foi realizado para a fonte inorgânica.

O acondicionamento do solo na coluna foi feito manualmente, iniciou com as camadas inferiores até a superior. Para a acomodação do solo nas colunas assumiu-se uma densidade média do solo de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, que é a média encontrada para esse tipo de solo (SANTOS, et al., 2012; KANG et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2011; SANTOS et al., 2010). A profundidade de 0 a 10 cm foi levemente acomodada, pois o solo quando lavrado fica com menor densidade.

Visando dissipar a energia do impacto da gota e distribuir a solução sobre a superfície da coluna, evitando a indução de caminhos preferenciais, foram colocados sobre o solo 3 discos de malha de sombrite 50%, onde o bico que produzia o gotejamento ficou encostado.

Após a montagem das colunas, estas foram colocadas sobre uma estrutura de madeira com capacidade para seis colunas, onde continham funis para a condução do lixiviado aos recipientes de coleta.

4.2.4. Turnos e volume de solução percolada

Para a obtenção do lixiviado foi montado sobre as colunas um sistema de fornecimento de solução salina de CaCl_2 a $0,001 \text{ mol L}^{-1}$. Este sistema foi composto de um reservatório com capacidade de 80 L, um reservatório intermediário de 20 L com uma boia acoplada para a manutenção da carga hidráulica, mangueira de distribuição dos bicos gotejadores, estes últimos foram adaptados de mangueiras de equipo de soro hospitalar, pois continham reguladores de vazão (Figura 3).

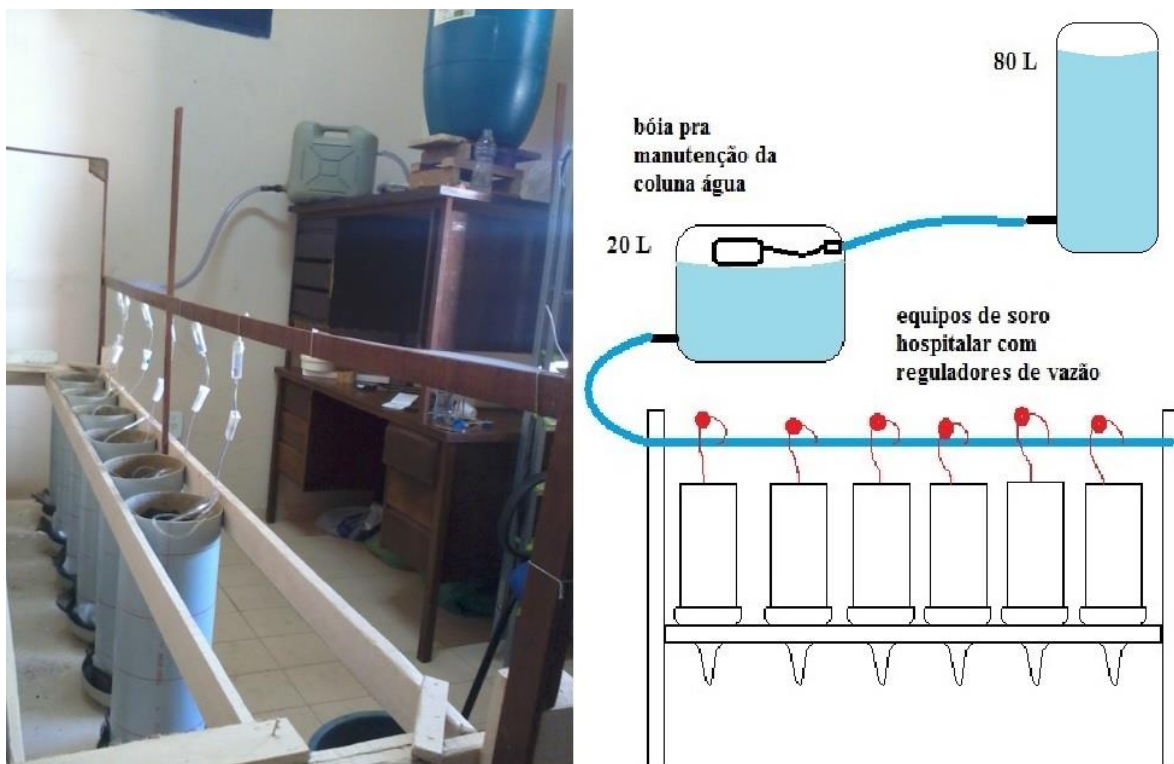


Figura 2. Sistema de fornecimento de solução salina às colunas de solo; A: sistema montado para o experimento 2 (colunas de 40 cm); B: croqui do sistema de distribuição de solução salina às colunas de solo.

Para a determinação do valor da vazão foi feito um teste com 2 colunas extras de forma que a vazão fosse aquela que não formasse lâmina na superfície do solo na coluna. A vazão para ambos os experimentos (1 e 2) foi a mesma, aproximadamente $10 \pm 2 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$.

O volume de solução aplicada foi calculado a partir do volume de poros (VP) da coluna. Como foi fixada a densidade do solo da coluna $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, sabendo-se a densidade de partícula (Tabela 2) e o volume de cada camada pode-se chegar ao VP da coluna por meio da equação (4):

$$VP = \pi r^2 h \left[1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \right] \quad (4)$$

Assim, para o experimento 1 o VP da coluna foi de $1503,06 \text{ cm}^3$ e para o experimento 2 de $3006,12 \text{ cm}^3$, ambos arredondados para 1500 e 3000 cm^3 , respectivamente.

Em função de não haver uma padronização na literatura para a quantidade de água aplicada, foram aplicados 10 VP total, sendo 1 VP por dia. A metodologia de Luchese et al., (2008) é a que mais se aproxima deste, os autores utilizam 10 pulsos em sete dias (1 pulso = 1 VP + 20%).

Após montado o sistema de fornecimento da solução salina e alocadas as colunas iniciou-se o processo umedecendo a coluna de forma descendente até sua saturação. A coleta das amostras foi feita com o início da drenagem fracionando cada VP em 3 alíquotas. Para o experimento 1 o volume de cada alíquota foi de 500 cm³ e para o experimento 2 de 1000 cm³. Para a captação das alíquotas do lixiviado foram utilizados recipientes calibrados em balança.

4.2.5. Determinações no lixiviado

Após a captação do lixiviado estes foram levados ao laboratório de Matéria Orgânica do Solo onde foram homogeneizados, filtrados em membrana de 0,45 µm, utilizando sistema de filtração a vácuo, só então determinado às concentrações de P conforme Murphy e Riley (1962).

4.2.6. Análise do solo das colunas

Após o término da lixiviação as colunas de solo foram secas em estufa a 50 C° e seccionadas a cada 5 cm. O solo de cada seção foi destorreado, homogeneizado, peneirado em malha de 2 mm e analisado quanto aos seguintes parâmetros: Pm e Pw sendo determinados no sobrenadante filtrado em membrana de 0,45 µm (MURPHY; RYLEY, 1962).

4.2.7. Balanço de P solúvel em água (Pw)

O balanço do Pw nas colunas foi realizado contabilizando-se as entradas e as saídas do nutriente, a fim de se obter informações da dinâmica desta forma de P em função da fonte. Para isso foram somadas as quantidades de Pw já existente no solo (Pwi do solo) e adicionada via fonte (Pwi fonte), sendo então subtraídas da quantidade lixiviada gerando o Pw final calculado (Pw final calc.). Então confrontado com o Pw final observado (Pw final obs.), extraído com água do solo das colunas após a lixiviação.

4.3. Análise estatística

Para avaliar os totais lixiviados de cada fonte foi feita análise de variância (ANOVA) e a comparação das médias pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Para avaliação da influência das fontes em cada profundidade foi realizado ANOVA e teste de Tukey ($p < 0,1$). Enquanto que a comparação das profundidades para cada fonte foi preciso realizar além da ANOVA e Tukey ($p < 0,1$) um modelo linear misto. Este tem o poder

de estimar um erro adicional na análise de variância para compensar as variações de P entre profundidades, devido a não independência dos dados, a falta de aleatoriedade e autocorrelação dos teores de P entre as profundidades. O programa utilizado para as análises estatísticas foi o software SAS 9.3 (2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Experimento 1 - colunas de 20 cm

A lixiviação do P foi maior com a fonte inorgânica, diminuindo de 9,67 mg de P no primeiro VP a 2,6 mg no décimo VP (Figura 4A). As fontes orgânicas tiveram comportamento oposto da fonte inorgânica, iniciando com média (n=12) de 1,5 mg de P lixiviado e aumentando até 2,7 mg no décimo VP (Figura 4B).

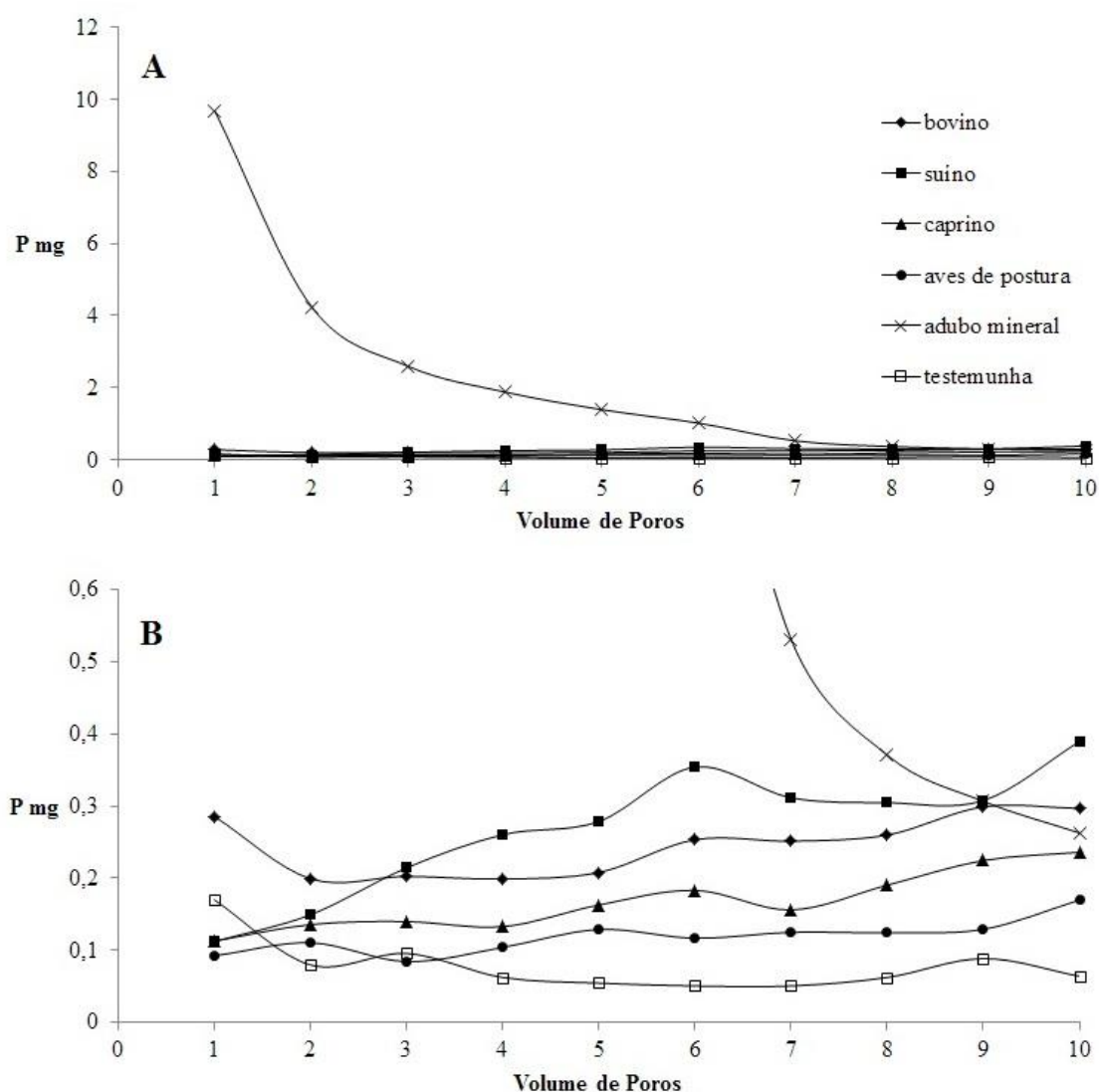


Figura 3. Lixiviação de P (mg) de um NEOSSOLO REGOLÍTICO acondicionado em colunas de 20 cm (experimento 1) tratadas sem e com quatro fontes orgânicas ou uma inorgânica em função do volume de poros aplicado. Fig. A: lixiviação de P (mg) de todos os tratamentos; Fig. B: mesmo que a figura A com corte no eixo “y” no teor correspondente a 0,6 mg de P.

Entre as fontes orgânicas, o P do esterco suíno foi o que mais lixiviou, havendo aumento dos teores de P até o sexto VP, com estabilização até o nono e voltando a aumentar no décimo VP (Figura 4B).

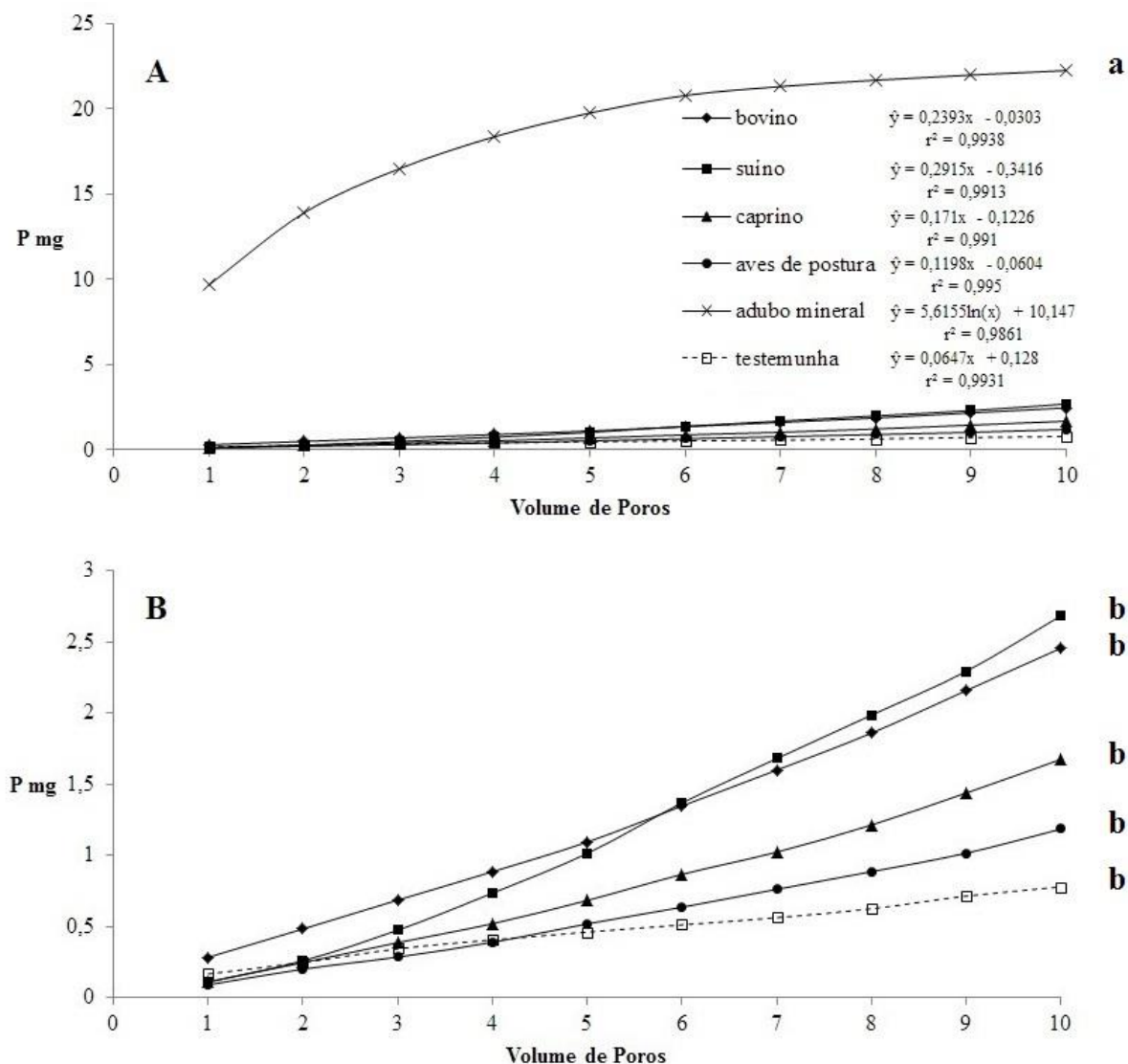


Figura 4. Lixiviação acumulada de P (mg) de um NEOSSOLO REGOLÍTICO acondicionado em colunas de 20 cm tratadas sem e com quatro fontes orgânicas ou uma inorgânica em função do volume de poros aplicado. Fig. **A**: lixiviação acumulada de P (mg) de todos os tratamentos; Fig. **B**: mesmo que a figura A com corte no eixo “y” no teor correspondente a 3 mg de P. Tratamentos seguidos de mesma letra minúscula não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,1$).

A lixiviação de P da fonte inorgânica apresentou uma tendência logarítmica ($r^2=0,99$) (Figura 5A), enquanto que as fontes orgânicas e a testemunha apresentaram tendência linear ($r^2=0,99$) (Figura 5B). e não diferiram entre si ($p < 0,1$) (Figura 5B).

Considerando que a entrada de P foi a mesma para todas as fontes (35,3 kg ha⁻¹ ou 62,5 mg coluna⁻¹ de P), o comportamento diferenciado entre as fontes orgânicas e inorgânica está relacionado com a fração solúvel em água do P nos esterco, 17,4; 16,0; 4,75; 6,18; 62,5 mg Pw coluna⁻¹ adicionados pelos esterco bovino, suíno, caprino, aves de postura e fonte inorgânica, respectivamente.

O P lixiviado pela fonte inorgânica que alcançou 22,3 mg, ou 34,4% do P adicionado, foi 18 vezes maior que a massa média de P lixiviado das fontes orgânicas (Figura 5A). Entretanto, como as fontes orgânicas continham bem menos Pw, a percentagem de P lixiviado oscilou entre 6,6 e 18,8% do Pwi. Por outro lado, o P lixiviado guardou relações com o conteúdo de Pw das fontes, pois os esterco bovino e suíno perderam praticamente o dobro do caprino e aves (Figura 5B). As características físico-químicas diferenciadas das fontes orgânicas, como teores de lignina (GALVÃO et al., 2008), além das formas químicas do P nos esterco (íon fosfato solúvel, nucleotídeos, fitina, fosfatos de Ca, polifosfatos) certamente contribuíram para as variações de P solúvel das fontes.

Perdas maiores de P a partir de fonte inorgânica também foram encontradas por Kang et al. (2011). Estes autores avaliaram a lixiviação de P proveniente de fontes orgânicas e inorgânicas em colunas de solo arenoso, onde perceberam maior lixiviação de P das fontes inorgânicas tendo o superfosfato triplo e o fosfato de potássio (KH₂PO₄) dissolvido perdido 63 e 71% do P adicionado, respectivamente, utilizando aproximadamente 23 VP. Contudo no presente estudo foram utilizados 10 VP e as perdas chegaram a 34,4% do P adicionado via fonte inorgânica.

É possível pensar que no presente experimento houve o arraste parcial das fontes pela solução percolante, por caminhos preferenciais dentro da coluna de solo (DJODJIC et al., 1999; SHARPLEY et al., 2003). Tentou-se prevenir ou reduzir esse efeito tratando a superfície interna das colunas com areia lavada. Além disso, há a consistência dos dados em relação à diferença entre a fonte inorgânica solúvel e as orgânicas, com menos P solúvel em água e, ainda, como já mencionado, o P lixiviado das fontes orgânicas guardou relação com o Pwi. Por esses motivos, embora a hipótese de caminhos preferenciais não possa ser totalmente descartada, foi considerada pouco provável.

Outro mecanismo se refere à competição de compostos da matéria orgânica (ácidos orgânicos e ácidos fúlvicos) pelos mesmos sítios de adsorção do P, que pode o ter mantido em

solução e passível de lixiviação (GUPPY et al, 2005a; GUPPY et al., 2005b). Em solo com baixo teor de argila, a presença dos ácidos orgânicos e húmico foi eficiente em bloquear os sítios de adsorção, promovendo menor adsorção do fosfato, do que em solo com maior teor de argila (ANDRADE, 2001). Reforçando a hipótese da competição, resultados não tabelados indicaram que o solo colocado nas colunas continha teor médio por camada de 52,6 mg kg⁻¹ de C na forma solúvel em água. Também é possível que tenha ocorrido a percolação de formas orgânicas de P (GALVÃO; SALCEDO, 2009), que podem ter sofrido hidrólise pela fosfatase enquanto a solução percolada estava sendo coletada.

As concentrações de Pw remanescente no solo das colunas após a lixiviação variaram com as fontes de P utilizadas (Figura 6).

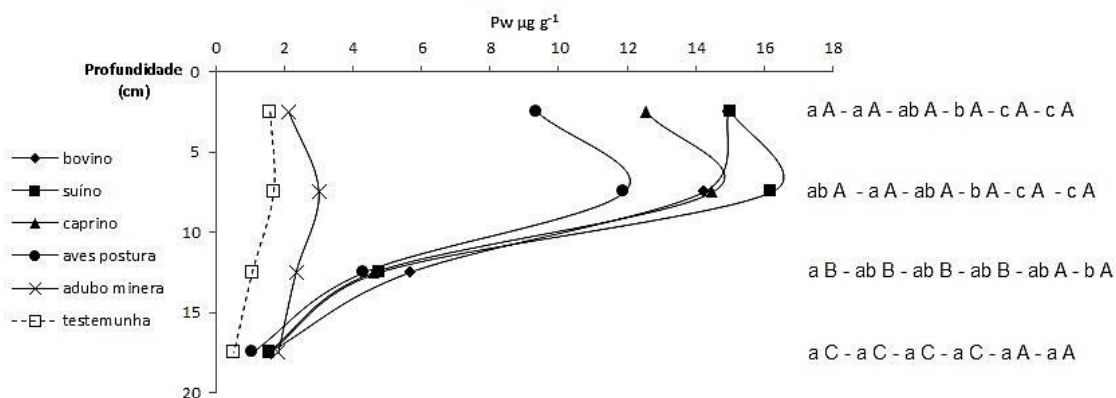


Figura 5. Distribuição da concentração de P extraído com água de colunas de 20 cm de profundidade de um NEOSSOLO REGOLÍTICO após a aplicação de 10 volumes de poros. Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,1$), letras minúsculas comparam fontes dentro de cada profundidade e letras maiúsculas comparam profundidade dentro de cada fonte. A sequência das letras respeita a ordem da legenda dos tratamentos (esterco bovino, suíno, caprino, aves de postura, fonte inorgânica e testemunha).

As menores concentrações de Pw no solo das colunas foram registradas na testemunha e no tratamento com a fonte inorgânica. As concentrações foram uniformes em profundidade e reduzidas no caso da fonte inorgânica, resultado consistente com a elevada perda de P por lixiviação dessa fonte (Figuras 5 e 6). O fato se deve a fácil movimentação dessa forma de P no perfil da coluna, o que promoveu menor acúmulo de Pw no solo sendo então as concentrações semelhantes à testemunha.

No entanto, o P lixiviado da fonte inorgânica foi na ordem de 34% do adicionado, o que indica que parte do P adicionado foi transformado para formas não solúveis em água. De fato, o balanço de Pw no solo antes e depois da lixiviação, computando-se também o P lixiviado, indica 33 mg a menos de Pw na coluna de solo que recebeu a fonte inorgânica (Tabela 7). Esta tendência será discutida junto com os resultados do experimento com colunas de 40 cm.

Tabela 7. Balanço de Pw nas colunas do experimento com colunas de 20 cm de um NEOSSOLO REGOLÍTICO tratado ou não com fontes orgânicas e uma inorgânica com as quais se adicionou a quantidade de 62,5 mg de P total.

Fonte	Bovino	Suíno	Caprino	Aves de postura	Fonte inorgânica	Test.
----- mg -----						
Pwi do solo	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15	5,15
Pwi fonte	17,4	16,0	4,75	6,18	62,5	0,00
Soma	22,6	21,2	9,90	11,3	67,6	5,15
Lixiviado	2,46±0,6	2,68±0,6	1,68±0,2	1,19±0,2	22,3±5,2	0,78±0,1
Pw final obs.	48,2±4,8	49,8±1,7	44,0±3,2	35,4±1,2	12,3±2,2	6,46±1,7
Pw final calc.	20,1	18,5	8,23	10,1	45,3	4,37
Diferença ⁵	28,1	31,3	35,7	25,2	-33,0	2.1

Pwi fonte: quantidade de Pw em mg adicionado via fonte antes da lixiviação; Soma: soma das quantidades de Pw no solo inicial e adicionada via fonte; Pw final obs.: Pw final real extraído em água do solo das colunas; Pw final calc.: Pw final calculado pela diferença entre a soma² e Lixiviado; Diferença : diferença entre Pw final obs. E Pw final calc.; ± erro padrão; massa de cada camada igual a 2,65kg.

Dentre as fontes orgânicas, o Pw de aves apresentou a menor concentração nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm (Figura 6), resultado coerente com o baixo Pw adicionado por essa fonte (Tabela 7). O Pw de caprino, no entanto, que foi semelhante ao de aves, não diferiu ($p<0,1$) com bovino e suíno. Também no P lixiviado acumulado (Figura 5), o tratamento com esterco caprino ficou em uma posição intermediária entre aves (menor) e suíno e bovino (maiores) (Tabela 7). Esta tendência do Pw caprino, consistente no P lixiviado e no Pw remanescente no solo, sugere um aumento na solubilidade do P da fonte caprino durante o transcurso do experimento.

A natureza dos esterco e a sua mineralização são muito heterogêneas e dependentes da espécie, da idade dos animais, da alimentação e das condições físicas e químicas do solo. Essas condições ditam a velocidade de decomposição e consequente solubilização das formas orgânicas e inorgânicas dos nutrientes que os compõem (TEDESCO et al., 1999). Souto et al. (2005) avaliando a decomposição de esterco no semiárido da Paraíba relatam que a maior taxa de decomposição foi encontrada para os esterco caprino e bovino e que foram fortemente influenciadas pela pluviosidade durante o período experimental.

Na comparação entre camadas, o Pw das fontes orgânicas foi semelhante ($p < 0,10$) nas duas primeiras, mas na camada de 10 a 15 a concentração foi intermediária ($p < 0,10$) entre 5 a 10 cm e 15 a 20 cm, demonstrando o deslocamento vertical do Pw das fontes orgânicas. Cabe indagar sobre o motivo desse Pw não ter se deslocado com a mesma intensidade que o Pw da fonte inorgânica. Uma possibilidade é que essa forma solúvel de P tenha sido formada in-situ durante os 25 dias do experimento (15 dias de incubação e 10 dias de lixiviação), como resultado da mineralização das fontes orgânicas. Os dados do balanço entre entradas e saídas de P, que indicam recuperações de Pw maiores que as entradas sugerem esta última possibilidade (Tabela 7). Nesse sentido, o esterco de aves seria mais resistente à mineralização que as outras três fontes.

É importante ressaltar que no experimento 1, com colunas de 20 cm, o VP total aplicado foi de 15 L. Comparando com a média dos últimos dez anos (Figura 1) que é de 998 mm, ou equivalente a 17,6 L, ainda assim as fontes orgânicas acumularam P em forma disponível às plantas na coluna, diferentemente da fonte inorgânica.

5.2. Experimento 2 – colunas de 40 cm

No experimento 2, com colunas de 40 cm de comprimento e utilizando também 10 VP, não houve presença de P no lixiviado. É importante notar, na comparação da figura 7 com a figura 6, que no experimento 2 a máxima concentração de Pw no solo foi de $5,3 \mu\text{g g}^{-1}$ de P, enquanto que no experimento 1 atingiu pouco mais de $16 \mu\text{g g}^{-1}$ de Pw. Isso foi devido ao volume de poros no experimento 2 (3000 ml/VP) foi o dobro do experimento 1 (1500 ml/VP), totalizando 30 L por coluna. O fato do P não ter sido lixiviado indica ter havido interação do P com a matriz do solo na camada de 20 a 40 cm, mesmo o solo sendo de textura arenosa e com predomínio de quartzo e de feldspatos nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm, respectivamente (Tabela 1); contudo, é importante observar que, mesmo pequena, existiu a contribuição de

hematita (Tabela 1) na não lixiviação do P das colunas de 40 cm, promovendo adsorção de P no solo.

As maiores concentrações de Pw foram encontradas nas camadas superficiais (0 a 15 cm) com a utilização das fontes orgânicas. O esterco caprino apresentou as maiores concentrações, sem diferir das outras fontes orgânicas ($p < 0,1$), exceto o esterco bovino na camada de 0 a 5 cm e o esterco de aves de postura na camada de 10 a 15 cm. O Pw derivado da fonte inorgânica se comportou de forma intermediária não sendo diferente dos estercos bovino, de aves de postura e nem da testemunha (Figura 7).

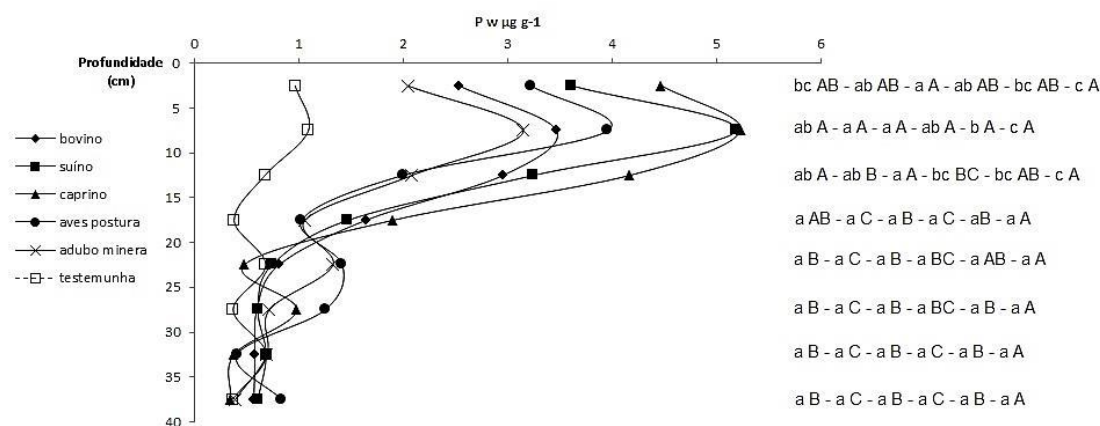


Figura 6. Distribuição da concentração de P extraído com água das colunas de 40 cm de profundidade de um NEOSSOLO REGOLÍTICO após a aplicação de 10 volumes de poros. Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,1$), letras minúsculas comparam fontes dentro de cada profundidade e letras maiúsculas comparam profundidade dentro de cada fonte. A sequência das letras respeita a ordem da legenda dos tratamentos (esterco bovino, suíno, caprino, aves de postura, fonte inorgânica e testemunha).

O Pw recuperado no solo no tratamento com a fonte inorgânica foi muito menor que o estimado a partir das quantidades existentes e adicionada via fonte, apresentando um déficit de 56,3 mg. Considerando que houve a movimentação do Pw de 0 a 20 cm para 20 a 40 cm de pelo menos 34% da fonte inorgânica, a partir dos resultados das colunas de 20 cm, esperava-se que valores semelhantes ao lixiviado fossem recuperados na camada de 20 a 40 cm o que não aconteceu, pois o Pw da fonte inorgânica nessa camada apresentou médias semelhantes à testemunha ($p < 0,1$) (Tabela 8).

Tabela 8. Balanço de Pw nas colunas de 40 cm de um NEOSSOLO REGOLÍTICO tratado ou não com fontes orgânicas e uma inorgânica.

Fonte	Bovino	Suíno	Caprino	Aves de postura	Fonte inorgânica	Test.
----- mg -----						
Pwi do solo	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60
Pwi fonte	17,4	16,0	4,80	6,20	62,5	0
Soma	26,0	24,6	13,3	14,7	71,0	8,60
Lixiviado	0	0	0	0	0	0
Pw final obs.	17,4±0,29	21,4±0,04	23,8±0,16	18,7±0,36	14,7±0,62	6,90±0,18
Pw final calc.	26,0	24,6	13,3	14,7	71,0	8,60
Diferença	-8,60	-3,20	10,5	4,00	-56,3	-1,70

Pwi fonte: quantidade de Pw em mg adicionado via fonte antes da lixiviação; Soma: soma das quantidades de Pw no solo inicial e adicionada via fonte; Pw final obs.: Pw final real extraído em água do solo das colunas; Pw final calc.: Pw final calculado pela diferença entre a soma² e Lixiviado; Diferença : diferença entre Pw final obs. E Pw final calc.; ± erro padrão; massa de cada camada igual a 2,65kg.

Nas fontes orgânicas, as diferenças entre o Pw experimental (observado) e o Pw teórico (calculado) foram menores no experimento 2 (Tabela 8) do que no experimento 1 (Tabela 7); no experimento 2 oscilaram entre 10,5 e -3,2 mg Pw e no experimento 1 entre 25,2 e 25,7 mg Pw. O aparecimento de Pw além da quantidade adicionada no experimento 1 foi interpretado como mineralização. Uma vez que o tempo de ambos experimentos foi igual, esperava-se encontrar um excesso de Pw semelhante no experimento 2. O fato disso não ter sido observado e, ainda, do desbalanço de Pw na fonte inorgânica aumentar de -33 para -56,3 mg Pw nos experimentos 1 e 2 respectivamente (Tabela 7 e 8) é atribuído à capacidade de retenção de P do solo na camada de 20 a 40 cm.

5.3. Adsorção e Dessorção de P

Apesar do solo utilizado no estudo conter baixos teores de argila (Tabela 2) este possui característica que podem favorecer o fenômeno de adsorção de P à sua matriz (Tabela 1 e 3).

A adsorção e precipitação de P do solo está diretamente ligada aos teores de Fe e Al (PINTO, 2012). Os resultados de Fe e Al amorfos, extraídos com oxalato de amônio, mostram aumento em profundidade (Tabela 3) e correlação positiva com os teores de argila ($r^2 = 0,90$ e

0,96, respectivamente). Trabalho realizado por Kang et al. (2011), utilizando solo de textura arenosa ($Fe_{ox}= 0,20$; $Al_{ox}=0,29$; argila=21 mg g⁻¹) semelhante ao deste estudo, constataram adsorção de P pelo solo, principalmente quando observados os dados obtidos do tratamento com fertilizante inorgânico. Tarkalson e Leytem (2009) também notaram ter havido adsorção de P por um solo com teor de argila de 62 mg g⁻¹. Portanto, a movimentação do P no perfil solo pode ser reduzida por pequenas quantidades de argila e/ou óxidos de Fe e Al (SIMS et al., 1998).

No presente estudo, a capacidade de adsorção de P ajustada pelas isotermas de Langmuir aumentou progressivamente com o aumento da profundidade (Figura 8).

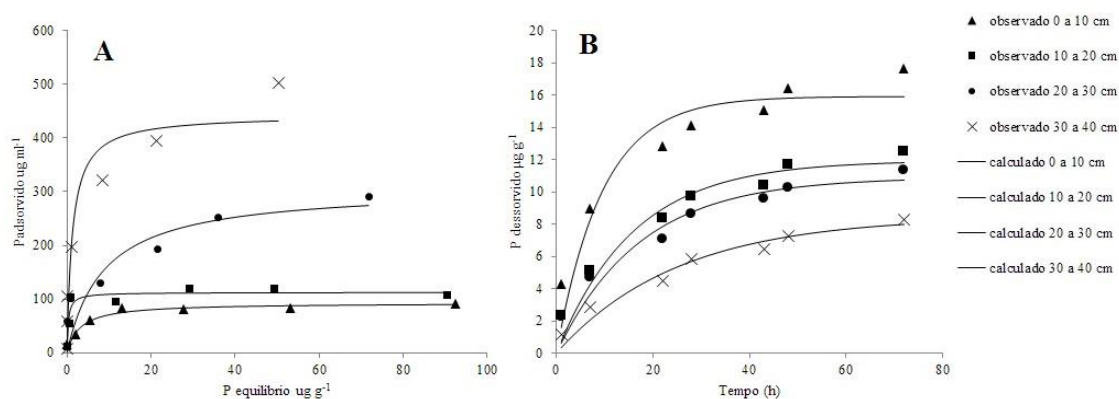


Figura 7. A: Isotermas de Langmuir para as profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm; B: dessorção de P para as profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm utilizando fitas de Fe.

Os valores de dessorção foram consistentes com os dados ajustados pela equação de Langmuir, pois com o aumento em profundidade houve aumento da energia de ligação (K_L), consequentemente uma cinética de dessorção de P (K_d) mais lenta (Figura 8 e Tabela 9).

Tabela 9. Parâmetros de dessorção (Fitas - Fe) e das isothermas de Langmuir ajustados por meio de regressão não linear para as profundidades de um NEOSSOLO REGOLÍTICO.

Prof.	Pw	Dessorção			Langmuir			Qmax
	inicial	Qin	K _d	r ²	K _L	Qmax	r ²	Fe e Al
cm	µg ml ⁻¹	mg kg ⁻¹	h ⁻¹		L kg ⁻¹	mg kg ⁻¹		mg kg ⁻¹
0 a 10	0,12	16 ± 1,0	0,10 ± 0,03	0,94	0,32 ± 0,08	93 ± 5	0,98	103
10 a 20	0,08	12 ± 0,8	0,06 ± 0,01	0,96	0,37 ± 0,07	128 ± 5	0,99	171
20 a 30	0,06	11 ± 0,9	0,05 ± 0,01	0,96	0,52 ± 0,14	285 ± 15	0,99	228
30 a 40	0,06	8,5 ± 0,8	0,04 ± 0,01	0,97	0,75 ± 0,35	445 ± 39	0,97	376

Qin: ¹P dessorvido; K_d: constante de dessorção de P; K_L: constante de Langmuir relacionada à energia de ligação do P; Qmax: capacidade máxima de adsorção de P; Qmax Fe e Al: capacidade máxima de adsorção de P pelo Fe e Al por Van der Zee e Van Reimsdijk (1988); ± erro padrão.

A relação entre Qmax e as quantidades de Fe_{ox} e Al_{ox} fica mais evidente quando os dados experimentais de Fe_{ox} e Al_{ox} são utilizados segundo Van der Zee e Van Reimsdijk (1988). Com base em pesquisas por estes autores, a capacidade do Fe e Al pouco cristalinos adsorverem P é aproximadamente igual à metade da soma das suas concentrações ((Fe_{ox} e Al_{ox})/2). Observa-se na tabela 9 a semelhança entre Qmax obtido pela equação de Langmuir e o obtido segundo Van der Zee e Van Reimsdijk (1988).

Com base nos dados de lixiviação do experimento 1, pode-se dizer que no experimento 2 houve movimentação de P da camada de 0 a 20 cm para a camada 20 a 40 cm. Esta movimentação foi, provavelmente, ainda maior por conta do volume aplicado de solução percolante no experimento 2 cm ter sido o dobro do primeiro experimento. No entanto, o Pw não foi recuperado na camada de 20 a 40 cm, sendo o teor de Pw das fontes orgânicas e inorgânica iguais a testemunha. A energia de ligação e o grau de instauração dessas camadas são maiores que nas de 0 a 20, onde acredita-se que o P foi transformado para formas não mais solúveis em água (Tabela 9).

O fósforo adsorvido pelo solo (P_{ads}) foi estimado com base nas isothermas de Langmuir, a partir da quantidade de Pw (mg L⁻¹) em equilíbrio com a fase sólida (Tabela 10). No caso da testemunha, o P_{ads} depois da lixiviação foi relativamente semelhante ao P_{ads} no solo inicial,

pre-lixiviação. Já para as colunas adubadas, o P_{ads} aumentou. A distribuição vertical de P_{ads} foi relativamente homogênea para o esterco caprino, concentrou-se na camada de 30-40 cm para os esterco bovino e suíno, enquanto que no esterco de aves de postura e fonte inorgânica o P_{ads} aumentou em 20-30 e 30-40 cm. Considerando-se como valor inicial de P_{ads} na coluna a média do solo inicial (não lixiviado) e da testemunha (lixiviada), $[(92,0 + 75,1)/2] = 83,6$ mg de P, a isoterma de Langmuir estimou valores de P_{ads} relativamente próximos do total de P envolvido (inicial + adicionado - $83,6 + 62,5 = 146,1$ mg de P) para todas as fontes (Tabela 10).

As quantidades de P dessorvido pelas fitas-Fe (P-Fe) apresentaram uma relação inversa com o P_{ads} estimado pela equação de Langmuir no solo inicial (Tabela 10). Na análise dessa aparente discrepância, deve-se lembrar que o P-Fe foi determinado experimentalmente de forma direta, dessorvendo o P na fita-Fe. Ainda, P-Fe guardou relação com os valores de P solúvel em água determinado em uma relação 1:10 (m:v) (Tabela 9, P_w inicial e Q_{in}). O P_{ads} de Langmuir, por outro lado, e estimado pelo ajuste da equação a dados experimentais e os parâmetros dessa equação, sobretudo o K_L , apresentaram uma incerteza considerável (Tabela 9). Ainda, o P_{ads} estimado por Langmuir, deriva de uma diferença entre o P adicionado a uma suspensão aquosa e o P encontrado em solução após, normalmente, 24 h de agitação. Assim, não há nenhuma inferência quanto a reversibilidade desse fenômeno. Foi demonstrado que, a medida que aumenta a capacidade de adsorção da fase sólida, aumenta também a resistência do P_{ads} para voltar a solução (Tiessen et al, 1993). Desta forma, embora as estimativas de P_{ads} por Langmuir tenham contabilizado o P adicionado com razoável aproximação, não é possível realizar inferências quanto à disponibilidade para as plantas desse fósforo.

Tabela 10. Valores de P adsorvido estimado pela equação de Langmuir a partir das quantidades de P solúvel em água em equilíbrio para as profundidades de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm de um NEOSSOLO REGOLÍTICO tratado com fontes orgânicas e inorgânica após lixiviação com 10 VP.

Prof.	Fitas - Fe	Solo inicial	Bovino	Suíno	Caprino	Aves de postura	Fonte inorgânica	Test.
	Dessorção	Langmuir						
cm	----- mg -----							
10	42,2	9,01	21,3	30,1	32,5	25,2	18,7	7,55
20	31,6	9,71	26,5	27,6	33,8	17,8	18,9	6,14
30	28,9	22,7	26,4	26,4	26,4	47,6	64,3	19,0
40	22,7	50,5	50,5	50,5	34,2	50,5	42,4	42,4
Total	125	92,0	125	135	127	141	144	75,1

*extrato de determinação 1:10 (m/v)

Com o intuito de comparar o método utilizado para a avaliação de P nos solos da região com o Pw, o solo das colunas de 40 cm após a lixiviação foi extraído pela solução de Mehlich-1.

As concentrações Pm e Pw apresentaram as mesmas tendências tanto para as fontes orgânicas quanto a inorgânica. Independente das fontes orgânicas a maior contribuição de Pm foi encontrada na camada de 0 a 15 cm com diminuição gradativa das concentrações de Pm em profundidade. A fonte orgânica com a maior média em 0 a 15 cm foi o esterco suíno. A fonte inorgânica, por outro lado, concentrou maiores valores de Pm entre as camadas de 15 a 25 cm, não diferindo da testemunha nas demais profundidades ($p < 0,1$) (Figura 9).

De modo geral, com base na distribuição das concentrações de Pm e Pw nas colunas do experimento 2, nota-se que estas guardam uma relação linear ($r^2 = 0,85$), de aproximadamente 6:1 (Pm/Pw) (Figura 10).

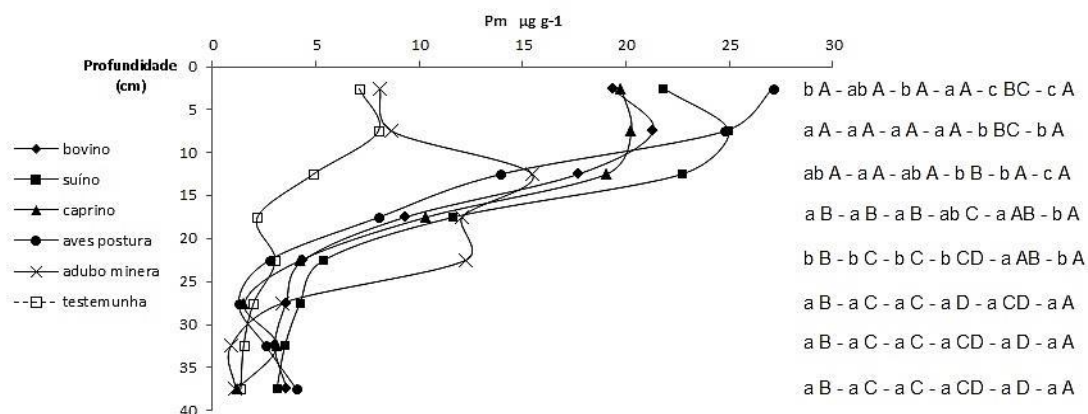


Figura 8. Distribuição da concentração de P extraído com Mehlich-1 de colunas de 40 cm de profundidade de um NEOSSOLO REGOLÍTICO após a aplicação de 10 volumes de poros. Tratamentos seguidos de mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,1$), letras minúsculas comparam fontes dentro de cada profundidade e letras maiúsculas comparam profundidade dentro de cada fonte. A sequência das letras respeita a ordem da legenda dos tratamentos (esterco bovino, suíno, caprino, aves de postura, fonte inorgânica e testemunha).

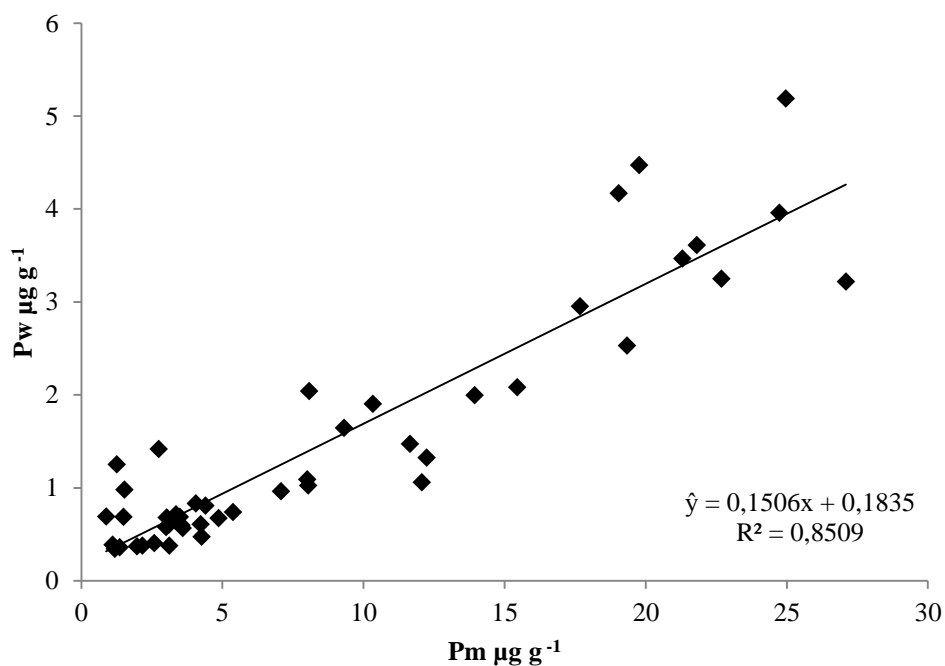


Figura 9. Relação entre P extraído por Mehlich-1 e P extraído por água de um NEOSSOLO REGOLÍTICO proveniente de agricultura familiar tratado com fontes orgânicas e inorgânica após 10 VP.

De forma geral, os resultados de lixiviação e distribuição de P nas colunas demonstraram que ocorreu uma translocação de P de camadas com menor energia de ligação para camadas com maior energia onde o solo agiu como verdadeiro sumidouro. Estudos comprovam que longos períodos de adubação com esterco podem promover mudanças nas características de adsorção de P influenciando no seu movimento para camadas mais profundas do perfil (DEL CAMPILLO et al., 1999; NELSON et al., 2005; SILVA et al., 2007; GALVÃO et al., 2008; XAVIER et al., 2009, TARKALSON; LEYTEM, 2009; ULÉN; ETANA, 2010; OJEKAMI et al., 2011; ABDALA et al 2012). Neste sentido, em solos saturados com P, poderá haver lixiviação deste, mesmo que não haja entrada excessiva de P. Nelson et al. (2005) constataram lixiviação de P superior as adições em horizontes saturados com P, quando a precipitação foi acima da média, indicando que a dessorção do P contribuiu com 50% do P lixiviado.

A saturação dos sítios de adsorção do solo pode não ser totalmente formada por íons fosfato, havendo competição dos mesmos sítios por ácidos orgânicos, apesar do íon fosfato ser preferencialmente adsorvido (ANDRADE, 2001; GUPPY et al, 2005a; GUPPY et al., 2005b). Neste caso, poderá haver lixiviação de P mesmo que o solo não esteja completamente saturado por P.

As concentrações remanescentes de Pw no solo das colunas de 20 cm provenientes dos esterco bovino e suíno se mantiveram dentro de uma faixa aceitável para o bom desenvolvimento das culturas, 13 e 26 mg L⁻¹ Pw no solo segundo del Campillo et al. (1999), mesmo após aplicação da solução percolante equivalente a uma precipitação de 851 mm. Isso mostra que essas duas fontes, bovino e suíno, disponibilizam maior quantidade de nutrientes na forma prontamente disponível às plantas, pois foram as que mais lixiviaram P entre as fontes orgânicas e tiveram maior valor de Pw remanescente no solo das colunas de 20 cm.

6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados pode-se concluir que houve lixiviação de P das fontes nas colunas de 20 cm, com maior expressão para a fonte mineral solúvel, sendo a menor lixiviação de P das fontes orgânicas influenciada pela solubilidade das formas de P das fontes.

O deslocamento do P extraído com água e por Mehlich-1 foi expressivamente reduzido pelas características de adsorção do solo, principalmente na camada de 20 a 40 cm, provando que mesmo um solo arenoso com pequena quantidade de óxidos de Fe pode comprometer a mobilidade do P no solo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adsorção pode se configurar como uma forma de perda de P mesmo em solos arenosos, contudo estudos mais aprofundados quanto à dinâmica da adsorção de P para solos arenosos são necessários, afim de, se determinar o quanto suportaria o solo até sua completa saturação.

Portanto, para utilização agrícola de esterco como fertilizantes é necessário o conhecimento não só de sua composição química, mas também das características químicas e físicas do solo, necessidades nutricionais da cultura e condições climáticas da região em que serão aplicados. Métodos empíricos para a fertilização com fontes orgânicas podem acarretar em prejuízos financeiros devido a baixa eficiência de sua utilização.

Ainda, racionalizar o uso dos esterco é importante, pois se trata de um recurso limitado com custos elevados para as condições financeiras da maioria dos produtores rurais da região semiárida nordestina. Estudos mais aprofundados na eficiência da utilização de fontes orgânicas quanto a produção vegetal e sua análise econômica são ainda necessários para a região Nordeste, principalmente no âmbito da agricultura familiar.

7. REFERÊNCIAS

ABDALA, D. B.; GHOSH, A. K.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; VENEGAS, V. H. A. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter addition. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.162, p.15-23, 2012.

Agência Executiva de gestão das águas do estado da Paraíba - AESA: monitoramento pluviométrico. Disponível em: <http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/monitoramentoPluviometria.do?metodo=listarAnosChuvadasAguas>>. Acesso em: 23 de janeiro, 2014.

AGUIAR, M. I.; LOURENÇO, I. P.; OLIVEIRA, T. S.; LACERDA, N. B. Perdas de nutrientes por lixiviação em um Argissolo Acinzentado cultivado com meloeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.4, p.811–819, 2006.

ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo** (Boletim Informativo), p.27-33, 2000.

ANDRADE, F. V. **Ácidos orgânicos e adsorção de fosfato em latossolos**. Viçosa, 2001. 56f. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001

BARTLETT, R. J.; ROSS, D. N. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, p.1191-1192, 1988.

BASSO, C. J. **Perdas de nitrogênio e fósforo com aplicação no solo de dejetos líquidos de suínos**. Santa Maria, 2003. 125f. Tese (Doutorado em Agronomia, Biodinâmica do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

BERTOL, O. J.; FEY, E.; RAVARETTO, N.; LAVORANTI, O. J.; RIZZI, N. E. Mobilidade de P, Cu e Zn em colunas de solo sob sistema de semeadura direta submetido às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1841-1850, 2010.

BERTOL, O. J.; LANA, M. C.; FEY, E.; RIZZI, N. E. Mobilidade de íons em solo sob sistema de semeadura direta submetidos às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1311-1321, 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. I. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro: Convênios MA/EPE-SUDENE/DRN; Rio de Janeiro: MA/CONTAP/USAID/BRASIL, 1972. 683p. (Boletim Técnico, 15).

CARNEIRO, W. J. O. **Padrões de liberação e disponibilidade de nitrogênio, fósforo e enxofre em solos tratados com resíduos orgânicos**. Lavras, 2012. 138f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo, Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

CEMBRANELLI, M. A. R. **Lixiviação de íons inorgânicos em solos que receberam fertilizantes nitrogenados**. Campinas, 2006. 82f. Dissertação (Mestrado em Agricultura tropical e subtropical, Gestão de recursos ambientais) – Instituto Agrônomo, Campinas, 2006

CERETTA, C. A.; LORENSINI, F.; BRUNETTO, G.; GIROTTO, E.; GATINONI, L. C.; LOURENZI, C. R.; TIECHER, T. L.; DECONTI, L. TRENTIN, G.; MIOTTO, A. Frações de fósforo no solo após sucessivas aplicações de dejetos de suíno em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.6, p.593-602, 2010.

CHACÓN, E. A. V. **Caracterização, decomposição e biodisponibilidade de nitrogênio e fósforo de materiais orgânicos de origem animal e vegetal**. Viçosa, 2006. 143f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição Mineral de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

CHARDON, W. J.; OENEMA, O.; DEL CASTILHO, P.; VRIESEMA, R.; JAPENGA, J.; BLAAUW, D. Organic phosphorus in solutions and leachates from soils treated with animal slurries. **Journal of Environmental Quality**, v.26, p.372-378, 1997.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v.64, p.197-214, 1995.

DEL CAMPILLO, M. C.; VAN DER ZEE, S. E. A. T. M.; TORRENT, J. Modelling long-term phosphorus leaching and changes in phosphorus fertility in excessively fertilized acid sandy soils. **European Journal of Soil Science**, v.50, p. 391-399,1999.

DJODJIC, F.; BERGSTRÖM, L.; ULÉN, B. & SHIRMOHAMMADI. A. Mode of transport of surface-applied phosphorus-33 through a clay and sandy soil. **Journal of Environmental Quality**, v. 28, p.1273-1282, 1999.

DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; ALVAREZ V. V. H.; FERREIRA, P. A.; CANTARUTTI, R. B.; SILVA, A. T.; COUTINHO, G. Distribuição do amônio, nitrato, potássio, e fósforo em colunas de Latossolos fertirrigadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2493-2504, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. EMBRAPA – CNPS.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. 306p. EMBRAPA – CNPS.

FARIAS, D. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, D.; ARRUDA, J. A.; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba. I – Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 623-632, 2009.

FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Efeito da calagem e sulfato de amônio no algodão. I – Transporte de cátions e ânions do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.425-432, 2006.

FRANCHINI, J. C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.12, p.2267-2276, 1999.

GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H. Soil phosphorus fractions in sandy soils amended with cattle manure for long periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.613-622, 2009.

GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.1, p.99-105, 2008.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; BLAMEY, F. P. C.; MOODY, P. W. Do decomposing organic matter residues reduce phosphorus sorption in highly weathered soil? **Soil Science Society of America Journal**, v.69, p.1405-1411, 2005.b

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.43, p.189-202, 2005. a

JORDÃO, C. B. **Especiação e grau de saturação de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto**. Piracicaba, 2006. 83f. Tese (Doutorado em Agronomia, Solos e nutrição de plantas) – Universidade de São Paulo, Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2006.

KAMPHAKE, L. J.; HANNAH, S. A.; COEHN, J. M. Automated analysis for nitrate by hydrazine reduction. **Water Research**, v.1, p.205-216, 1967.

KANG, J.; AMOOZEGAR, A.; HESTERBERG, D.; OSMOND, D. L. Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources. **Geoderma**, v.161, p.194-201, 2011.

KROM, M. D. Spectrophotometric determination of ammonia: a study of a modified Berthelot reaction using salicylate and dichlorocyanurate. **The Analyst**, v.105, p.305-316, 1980.

LUCHESI, A. V.; COSTA, A. C. S.; SOUZA JUNIOR, I. G. Lixiviação de íons após a aplicação de resíduos orgânicos de uma indústria farmoquímica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.189-199, 2008.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: Métodos de análise**, Viçosa: UFV, 2005. 77p.

MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H. **Fertilidade do solo e produção de biomassa no semiárido**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2008. 291p.

- MENEZES, R. S. C; SALCEDO, I. H. Mineralização de N após incorporação de adubos orgânicos em um Neossolo Regolítico cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.4, p.361-367, 2007.
- MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 3ª ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 285p.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2002. 626p.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. **Analytica Chimica Acta**, v.27, p.31-36, 1962.
- NASCIMENTO, J.T.; SILVA, I.F.; SANTIAGO, R.D.; SILVA NETO, L.F. Efeito de leguminosas nas características químicas e matéria orgânica de um solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.7, p.457-462, 2003.
- NELSON, N. O.; PARSON, J. E.; MIKKELSEN, R. L. Field-scale evaluation of phosphorus leaching in acid sandy soils receiving swine waste. **Journal of Environmental Quality**, v.34, p.2024-2035, 2005.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F. FONTES, R.L.; CANTARUTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (eds.) **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-550.
- OJEKAMI, A.; IGE, D.; HAO, X.; AKINREMI, O. Phosphorus Mobility in a Soil with Long Term Manure Application. **Journal of Agricultural Science**, v.3, n.3, p.25-38, 2011.
- OLIVEIRA, F. F.; SALCEDO, I. H.; GALVÃO, S. R. Adubação orgânica e inorgânica de batatinha em solos arenosos: Produtividade, nutrientes na planta e lixiviação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.12, p.1228-1234, 2011.

OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. M. O.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; MORTATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a Sandy soil cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.6, p.861-868, 2002.

PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B. Sorção de fósforo em alguns solos do semiárido do Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.7, p.1179-1184, 1998.

PINTO, F. A. **Sorção e dessorção de fósforo em solos de cerrado**. Jataí, 2012. 46f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Produção vegetal) – Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2012.

PIOVESAN, R. P.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. & REISSMANN, C. B. Perdas de nutrientes via subsuperfície em colunas de solo sob fertilização mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.757-766, 2009.

RHEINHEIMER, D. dos S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001.

ROY, B.; DZOMBACK, D.A. Colloid release and transport processes in natural and model porous media. Preprint extended abstract, division of environmental chemistry, **American Chemical Society**, Anaheim, CA, 1995.

RUBÆK, G. H.; KRISTENSEN, K.; OLESEN, S. E.; ØSTERGAARD, H. S. Phosphorus accumulation and spatial distribution in agricultural soils in Denmark. **Geoderma**, v.209-210, p.241-250, 2013.

SABOURIN, E.; SILVEIRA, L.M.; TONNEAU, J.P.; SIDERSKY, P. **Fertilidade e agricultura familiar no Agreste Paraibano: Um estudo sobre o manejo da biomassa**. Esperança, CIRAD-TERRA/ASPTA, 2000. 59p.

SANTOS, D. R.; CASSOL, P. C.; KAMINSKI, J.; ANGHINONI, I. Fósforo orgânico no solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª Ed. Porto Alegre: Metrópole. 2008, p.101-111.

SANTOS, J. C. B.; SOUZA, JUNIOR V. S. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de NEOSSOLOS REGOLÍTICOS da

região semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.683-695, 2012.

SANTOS, J. S.; LIMA, V. L. A.; JÚNIOR, J. C. F. B.; SILVA, L. V. B. D.; AZEVEDO, C. A. V. Mobilidade de solutos em colunas de solo com água residuária doméstica de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.11, p.1226-1233, 2010.

SAS. SAS/STAT 9.3. **User's Guide**. Cary, NC: SAS Institute. Inc. 2011, 8621p.

SCHOUMANS, O. F.; GROENENDIJK, P. Modeling soil phosphorus level and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands. **Journal of Environmental Quality**, v.29, p. 111-116, 2000.

SCHWERTMAN, W. U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit saurer Ammoniumoxalat-Lösung. Z. **Pflanzenernaehr Bodenkd**, v.105, p.194-202, 1964.

SHARPLEY, A. N.; McDOWELL, R. W.; KLEINMAN, J. A. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.2048-2057, 2004.

SHARPLEY, A. N.; WELD, J. L.; BEEGLE, D. B.; KLEINMAN, P. J. A.; GBUREK, W. L.; MOORE, P. A.; MULLINS, G. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the U.S. **J. Soil Water Conserv**, v.58, n.3, p.137-152, 2003.

SILVA, T. O.; MENEZES, R. S. C. Adubação orgânica da batata com esterco e, ou, *Crotalaria juncea*. II – Disponibilidade de N, P e K no solo ao longo do ciclo de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.31, p.51-61, 2007.

SIMS, J. T.; SIMARD, R. R.; JOERN, B. C. Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research. **Journal of Environmental Quality**, v.27, p.227-293, 1998.

SNYDER, J.D.; TROFYMOW, J.A. A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil sample. In: **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v.15, n.5, p.587-597, 1984.

SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S. SANTOS, R. V.; ARAÚJO, G. T.; SOUTO, L. S. Decomposição de esterco dispostos em diferentes profundidades em área degradada no semi-árido da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.29, p.125-130, 2005.

SYSTAT SOFTWARE. **SigmaPlot for windows**. Version 10.0. San Jose: Systat Software, 2006.

TARKALSON, D. D.; LEYTEM, A. B. Phosphorus mobility in soil columns treated with dairy manures and commercial fertilizer. **Soil Sci**, v.174, p.73-80, 2009.

TEDESCO, M. J.; SELBACH, P. A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F. A. **Resíduos orgânicos no solo e os impactos no ambiente**. In: SANTOS, G. A. & CAMARGO, F. A. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese. 1999. P. 159 – 192.

TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985, 188p. (Boletim técnico de Solos, 5)

TIESSEN, H. ; ABEKOE, M. K. ; SALCEDO, I. H. ; OWUSU-BENNOAH, E. . Reversibility Of Phosphorus Sorption By Ferruginous Nodules. **Plant and Soil**, v. 153, n.1, p. 113-124, 1993.

ULÉN, B.; ETANA, A. Risk of phosphorus leaching from low input grassland areas. **Geoderma**, v.158, p.359-365, 2010.

VAN DER ZEE, S. E. A. T. M.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Model for long-term phosphate reaction kinetics in soil. **Journal of Environmental Quality**, v.17. p.35-41, 1988.

VAN DER ZEE, S. E. A. T. M.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Sorption kinetics and transport of phosphate in sandy soil. **Geoderma**, v.38, p.293-309, 1986.

VAN DER ZEE, S.E.A.T.M.; FOKKINK, L. G. J.; VAN RIEMSDIJK, W. H. A new technique for assessment of reversibly adsorbed phosphate. **Soil Science America Journal**, v.51, p.599-604, 1987.

XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S. Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil. **Geoderma**, v.151, p.417-423, 2009.

ZOTELLI, L. C. **Palha e vinhaça: emissões de CO₂, N₂O e CH₄ em solo com cana-de-açúcar**. Campinas, 2012. 88f. Dissertação (Mestrado em Agricultura tropical e subtropical, Gestão de recursos ambientais) – Instituto Agronômico, Campinas, 2012.